



DESAIN KENDALI OPTIMAL *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* (LQG) UNTUK SISTEM *TURRET GUN* DENGAN PENGUJIAN PADA SUMBU AZIMUTH

TUGAS AKHIR

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi



Oleh :

YOSÈS NAEL MANGARIMPUN SITOMPUL
11555102898

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SULTAN SYARIF KASIM RIAU
PEKANBARU
2020**

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

Hak cipta milik UIN Suska Riau

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

LEMBAR PERSETUJUAN

DESAIN KENDALI OPTIMAL *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* (LQG) UNTUK SISTEM *TURRET GUN* DENGAN PENGUJIAN PADA SUMBU AZIMUTH

TUGAS AKHIR

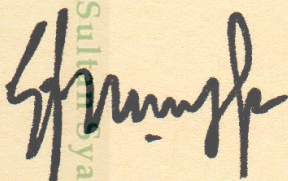
Oleh :

YOSSES NAEL MANGARIMPUN SITOMPUL

11555102898

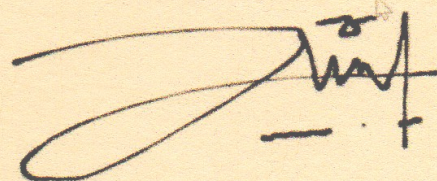
Telah diperiksa dan disetujui sebagai Laporan Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro, di
Pekanbaru, pada tanggal 3 Juli 2020

Ketua Program Studi



Ewi Ismaredah, S.Kom., M.Kom
NIP. 19750922 200912 2 002

Pembimbing



Aulia Ullah, ST., M.Eng
NIP. 198506182015031003

DESAIN KENDALI OPTIMAL *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* (LQG) UNTUK SISTEM *TURRET GUN* DENGAN PENGUJIAN PADA SUMBU AZIMUTH

TUGAS AKHIR

Oleh:

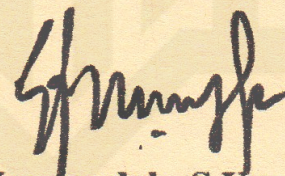
YOSSES NAEL MANGARIMPUN SITOMPUL
11555102898

Telah dipertahankan di depan Sidang Dewan Penguji
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik
Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau
di Pekanbaru, pada tanggal 3 Juli 2020

Pekanbaru, 3 Juli 2020

Mengesahkan,

Ketua Program Studi



Ewi Ismaredah, S.Kom., M.Kom
NIP. 19750922 200912 2 002

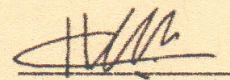
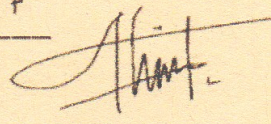
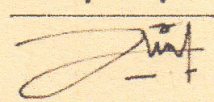
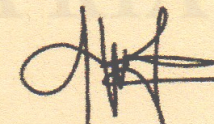
Dekan



Dr. Orsana Ahmad Darmawi, M.Ag
NIP. 19660604 199203 1 004

DEWAN PENGUJI :

Ketua : Dr. Alex Wenda, ST., M.Eng
Sekretaris : Aulia Ullah, ST., M.Eng
Anggota I : Ahmad Faizal, ST., MT
Anggota II : Halim Mudia, ST., MT





LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL

Tugas Akhir yang tidak diterbitkan ini terdaftar dan tersedia di Perpustakaan Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau dan terbuka untuk umum dengan ketentuan bahwa hak cipta ada pada penulis. Referensi kepustakaan diperkenankan dicatat, tetapi pengutipan atau ringkasan hanya dapat dilakukan dengan mengikuti kaidah pengutipan yang berlaku.

Penggandaan atau penerbitan sebagian atau seluruh Tugas Akhir ini harus memperoleh izin dari Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau. Perpustakaan yang meminjamkan Tugas Akhir ini untuk anggotanya diharapkan untuk mengisi nama, tanda peminjaman dan tanggal pinjam.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

UIN SUSKA RIAU



LEMBAR PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa didalam Tugas Akhir ini tidak terdapat karya yang pernah diajukan oleh saya maupun orang lain untuk keperluan lain, dan sepanjang pengetahuan saya juga tidak memuat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali disebutkan dalam referensi dan di dalam daftar pustaka.

Saya bersedia menerima sanksi jika pernyataan ini tidak sesuai dengan yang sebenarnya.

Pekanbaru, 3 Juli 2020

Yang membuat pernyataan,

Yoses Nael Mangarimpun Sitompul
NIM. 11555102898

- Hak Cipta Ditamalkan UIN Suska Riau
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



LEMBAR PERSEMBAHAN

Puji dan syukur saya ucapkan kepada Tuhan yang Maha Esa yang selalu memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga saya masih diberi kesempatan untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini.

Saya persembahkan karya ilmiah ini kepada Ayahanda dan Ibunda tercinta yang telah menjadi pelita dan menopang semangat hidup saya atas semua pengorbanan, doa, dan jerih payahnya agar saya dapat mencapai cita-cita. Adapun cita-cita saya kelak dapat membahagiakan Ayahanda dan Ibunda tercinta. Kepada dosen pembimbing saya ucapkan terimakasih telah membimbing, membantu, menasehati, dan memberi saran dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini hingga selesai tepat pada waktunya. Kepada dosen penguji terimakasih juga telah memberikan kritik dan saran yang sifatnya membangun sehingga Tugas Akhir ini mampu diselesaikan sesuai prosedur. Rasa terima kasih juga saya ucapkan kepada Rekan-rekan seperjuangan yang telah menemani saya ketika suka maupun duka, memotivasi dan menginspirasi hingga saya mampu menyelesaikan Tugas Akhir ini. Semoga Allah SWT membalas kebaikan kalian semua dengan pahala yang berlipat ganda. Aamiin.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



DESAIN KENDALI OPTIMAL *LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN* (LQG) UNTUK SISTEM *TURRET GUN* DENGAN PENGUJIAN PADA SUMBU AZIMUTH

YOSSES NAEL MANGARIMPUN SITOMPUL

NIM : 11555102898

Tanggal sidang : 3 Juli 2020

Program Studi Teknik Elektro

Fakultas Sains dan Teknologi

Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau

Jl. Soebrantas No. 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Senjata adalah salah satu komponen penting dalam mendukung pertahanan dan keamanan di sebuah negara. Contoh senjata yang terus berkembang ialah *turret gun*. *Turret gun* adalah sistem senjata laras panjang yang dapat bergerak untuk mengenai target dengan pergerakan arah dan sudut sesuai dengan target, yang dapat dioperasikan menggunakan *remote control*. Permasalahan dari *turret gun* saat di simulasikan ialah sistem memiliki respon yang lambat untuk mencapai *setpoint*. Untuk mengatasi permasalahan pada sistem *turret gun* penulis mengusulkan menambahkan pengendali *Linear Quadratic Gaussian* yang di hybrid dengan sistem gabungan antara *Linear Quadratic Regulator* dan Kalman Filter. Usulan ini di dasarkan pada kemampuan pengendali LQG dan sifat pengendali ini cocok untuk sistem yang mampu mengatasi sistem yang rentan terhadap gangguan. Dengan menggunakan aplikasi Matlab, proses simulasi sistem *turret gun* dengan pengendali *Linear Quadratic Gaussian* dengan variabel nilai $R = 0.01$, $Q = \begin{bmatrix} 0.0066 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, $K_f = 0.001$, $Q_f = 2$ mendapatkan hasil respon sistem dengan nilai *rise time* 3.41 detik, *settling time* 4.85 detik, *delay time* 1.84 detik, *maximum overshoot* 1.1% dan nilai *error* 0. Dengan hasil ini penambahan kendali LQG terbukti mampu mempengaruhi respon sistem *turret gun* yang sesuai dengan tujuan penelitian. Maka berdasarkan hasil pengujian menunjukkan permasalahan sistem *turret gun* yang lambat dalam respon sistem untuk mencapai *set point* berhasil diatasi.

Kata kunci : *Linear Quadratic Gaussian*, *Turret Gun*, Pengendali



DESIGN OF OPTIMAL LINEAR QUADRATIC GAUSSIAN (LQG) CONTROL FOR TURRET GUN SYSTEMS WITH TESTING ON AXIS AZIMUTH

YOSSES NAEL MANGARIMPUN SITOMPUL

NIM 11555102898

Date of trial : 3 July 2020

Electrical Engineering Study Program

Faculty of Science and Technology

Sultan Syarif Kasim Riau State Islamic University, Riau

Soebrantas St. Number 155 Pekanbaru

ABSTRAK

Weapon is one of important components in supporting defense and security in a country. Example of weapons that continue to grow is turret gun. Turret Gun is a long-barreled weapon system that can move according to the directional movement and angle of the target, which can be operated using remote control. Turret gun have a problem when system at simulated have a slow response to reach the setpoint. To solve problem of turret gun system, the author proposes to add a Linear Quadratic Gaussian controller in a hybrid with a combined system of Linear Quadratic Regulator and Kalman Filter. This proposal is based on the capabilities of the LQG controller and the properties of this controller are suitable for systems capable of overcoming systems that are prone to interference. By using the Matlab application, the turret gun system simulation process with the LQG controller with variable values $R = 0.01$, $Q = 0.0066$, 0.0 , $K_f = 0.001$, $Q_f = 2$ get the system response with the rise time value rise time 3.41 second, settling time 4.85 second, delay time 1.84 second, maximum overshoot 1.1% dan nilai error 0. With these result addition of LQG control is able to influence the response of the turret gun system in accordance with the research objectives. The based on the test results show that the problem of the turret gun system which is slow in the system response to reaching the setpoint has been resolved.

Keyword: LQG controller, Turret gun, Controller



KATA PENGANTAR

Assalammu'alaikumwarahmatullahiwabarakatuh

Alhamdulillah rabbi 'alamin, segala puji dan syukur selalu tercurah kehadiran Allah Swt atas limpahan Rahmat, Nikmat, Ilmu, dan Karunia-Nya kepada penulis. *Shalawat* beserta salam penulis ucapkan kepada Nabi Muhammad SAW, semoga kita diberi *syafaat* di *YaumulAkhir* nanti. Atas ridho Allah SWT penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan judul **“Desain Kendali Optimal *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) Untuk Sistem *Turret Gun* Dengan Pengujian Pada Sumbu Azimuth”**.

Banyak sekali yang telah penulis peroleh berupa ilmu pengetahuan dan pengalaman selama menempuh pendidikan di Program Studi Teknik Elektro. Penulis berharap Tugas Akhir ini nantinya dapat berguna bagi semua pihak yang memerlukannya. Penulisan Tugas Akhir ini tidak terlepas dari bantuan dari berbagai pihak. Maka dari itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terimakasih yang setulusnya kepada pihak-pihak yang terkait berikut:

1. Teristimewa Kedua Orang tua penulis, ayahanda Dimpos Sitompul dan Ibunda tercinta Duma Artha Siahaan, dan juga ayunda Briptu. Irma Roza Sitompul serta adinda Shella Widia Sitompul, Friska Paskalina Sitompul dan Shara Lusiana Sitompul yang telah mendo'akan dan memberikan dukungan, serta motivasi agar penulis dapat tawakal dan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan baik.
2. Bapak Prof. Dr. H. Akhmad Mujahidin, S.Ag., M.Si, selaku Rektor Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
3. Bapak Drs. Ahmad Darmawi, M.Ag, selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
4. Ibu Ewi Ismaredah, S.Kom., M.Kom, selaku Ketua Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
5. Bapak Mulyono, ST., MT, selaku Sekretaris Ketua Program Studi Teknik Elektro sekaligus sebagai Penasehat Akademik di Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Kasim Riau.
6. Bapak Ahmad Faizal, ST., MT, selaku koordinator Tugas Akhir Program Studi Teknik Elektro Fakultas Sains dan Teknologi yang selalu membantu memberikan inspirasi dan motivasi dalam penyelesaian tugas akhir ini.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

7. Bapak Aulia Ullah, ST, M.Eng dan Ibu Dian Mursyitah, ST, MT selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak meluangkan waktu serta pemikirannya dengan ikhlas dalam memberikan penjelasan dan masukan yang sangat berguna kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
8. Bapak Ahmad Faizal, ST., MT, selaku Dosen Penguji I dan Halim Mudia St., Mt, selaku Dosen Penguji II yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberi kritikan dan saran demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini.
9. Pimpinan, staff dan karyawan Program Studi Teknik Elektro serta Fakultas Sains dan Teknologi.
10. Kepada teman-teman pejuang tugas akhir yang selalu memberikan support (Syahrizal Ma'ruf, Muhammad Afdhol, Deswita Adliyani, Fadel Bayu, Riezky Adler, Alvia Riski, Gilang Pradipta, Arif Nugroho, Ade Akhir, Hamzah Al Pareshi, Kevin Mayeka, Reza Zulkarnaen, Meisha Desionasista)
11. Para Sahabat Seperjuangan Tercinta rekan-rekan seperjuangan angkatan 2015 dan terkhusus kelas TE'D 15. Serta Kakanda dan Adinda Mahasiswa Teknik Elektro UIN SUSKA RIAU yang selalu memberikan dukungan semangat dan motivasi selama penulis berkuliah di Teknik Elektro UIN SUSKA RIAU.
12. Semua pihak yang telah banyak membantu dan memberi motivasi dalam pengerjaan Tugas Akhir ini mulai dari awal hingga selesai yang tidak mungkin disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari dalam penulisan laporan ini masih banyak terdapat kekurangan serta kesalahan, untuk itu, penulis menerima segala saran serta kritik yang bersifat membangun, agar lebih baik dimasa yang akan datang.

Harapan penulis, semoga laporan Tugas Akhir ini dapat berguna bagi penulis sendiri khususnya, serta memberikan manfaat yang luar biasa bagi pembaca dimasa mendatang.

Amin.

Wassalamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh

Pekanbaru, 3 Juli 2020

Penulis

Yoses Nael Mangarimpun Sitompul

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR HAK ATAS KEKAYAAN INTELEKTUAL	iii
LEMBAR PERNYATAAN	iv
LEMBAR PERSEMBAHAN	v
ABSTRAK	vi
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR SIMBOL	xiii
DAFTAR SINGKATAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	I-1
1.1 Latar Belakang.....	I-1
1.2 Rumusan Masalah.....	I-4
1.3 Tujuan Penelitian.....	I-4
1.4 Batasan Masalah.....	I-4
1.5 Manfaat Penelitian.....	I-4
BAB II SASARAN DAN MANFAAT	II-1
2.1 Penelitian Terkait.....	II-1
2.2 Landasan Teori.....	II-2
2.2.1 Pengertian <i>TurretGun</i>	II-2
2.2.2 Pemodelan <i>TurretGun</i>	II-3
2.3 Pengendali Optimal <i>Linear Quadratic Gaussian</i> (LQC).....	II-11
2.3.1 Tahapan Perancangan LQC.....	II-13
2.4 Metode <i>Heuristic</i>	II-14
2.5 Identifikasi Sistem Orde 2.....	II-15
2.6 Kriteria Integral Menggunakan <i>Integral of Absolute Error</i> (IAE).....	II-16
2.7 Matlab.....	II-16
BAB III METODELOGI PENELITIAN	III-1
3.1 Proses Alur Penelitian.....	III-1
3.2 Pengumpulan Data.....	III-3

1. Disarankan untuk mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



3.3	Penentuan Variabel.....	III-4
3.4	Validasi Model Matematis	III-4
3.5	<i>Initial Result</i>	III-5
3.5.1	Perancangan Pengendali <i>Linear Quadratic Gaussian</i>	III-5
3.5.2	Memasukkan <i>transfer function</i> ke dalam pengendali LQC	III-6
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN		IV-1
4.1	Hasil dan Analisa Sistem Secara Umum	IV-1
4.2	Hasil <i>Open Loop</i> Sistem <i>Turret Gun</i> Sumbu Azimuth.....	IV-1
4.2.1	Analisa Hasil Sistem <i>Turret Gun</i> Secara <i>OpenLoop</i> pada sumbu Azimuth....	IV-7
4.3	Analisa Pengendalian LQC pada Sistem <i>Turret Gun</i> Sumbu Azimuth	IV-7
4.3.1	Hasil Pengendalian LQC pada Sistem <i>Turret Gun</i> Sumbu Azimuth	IV-7
4.3.2	Analisa Sistem <i>Turret Gun</i> dengan Pengendali LQC pada Sumbu Azimuth.....	IV-12

BAB V PENUTUP		V-1
5.1	Kesimpulan.....	V-1
5.2	Saran.....	V-1

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem <i>Turret</i> dan <i>Gun</i>	II-3
Gambar 2.2. <i>Free body diagram</i> sistem <i>Azimuth</i>	II-6
Gambar 2.3. Diagram Blok LQC.....	II-12
Gambar 2.4 Ikon Matlab.....	II-17
Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	III-2
Gambar 3.2 Blok simulasi <i>turret gun</i> secara <i>open loop</i>	III-4
Gambar 3.3 Grafik Respon <i>Open Loop</i>	III-4
Gambar 3.4 Blok Diagram <i>Turret Gun</i> Sumbu <i>Azimuth</i> dengan Pengendali LQG	III-8
Gambar 3.5 Tampilan Program M-File Sistem <i>TurretGun</i> Sumbu <i>Azimuth</i> Menggunakan Pengendali LQC	III-9
Gambar 4.1 Blok simulasi <i>Turret Gun open loop</i> pada sumbu <i>azimuth</i>	IV-1
Gambar 4.2 Hasil Grafik Respon <i>Open Loop</i> sistem <i>Turret Gun</i> pada sumbu <i>azimuth</i>	IV-15
Gambar 4.3 Hasil Potongan Waktu Tunda <i>Open Loop</i> Sistem <i>Turret Gun</i> Sumbu <i>Azimuth</i>	IV-15



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Nilai-nilai dari <i>Turret-gun</i>	II-10
Tabel 3.1	Matriks R Konstan dengan Analisa IAE	III-7
Tabel 4.1	Perbandingan Respon Sistem Turret Gun Sumbu Azimuth Dengan <i>Open Loop</i> dan Dipasang Pengendali LQG.	IV-9

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.





DAFTAR SIMBOL

- = Torsi
- = Matriks Inersia
- = Vektor gaya koriolis dan sentrifugal
- = Gaya gravitasi
- = Sudut *Azimuth*
- = Massa *Turret*
- = Massa *Gun*
- = Jari-jari *Turret*
- = Jari-jari *Gun*
- = Gaya gravitasi yang dialami sistem
- = Inersia ekivalen
- = Konstanta damping ekivalen
- = Gravitasi ekivalen
- = Gravitasi gun
- = Moment inersia motor DC
- = *error (Setpoint – Parameter Value)*
- = waktu (*second*)
- = variabel dari integrasi; dengan nilai antara 0 hingga kondisi
- = sumbu y (*Set point*)

- Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mengidentifikasikan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



DAFTAR SINGKATAN

Time Setling

Time Rise

Time Delay

Waktu Puncak

Setpoint

Linear Quadratic Gaussian

sumbu y (*set point*)

Hak Cipta, Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di Indonesia, ketika berbicara tentang pertahanan sama halnya dengan berbicara tentang tugas dan tanggung jawab Tentara Nasional Indonesia (TNI). Seiring berjalannya waktu akibat perkembangan zaman yang menimbulkan ancaman tidak hanya bersifat militer tetapi juga non-militer dan sampai saat ini berkembang cepat menjadi fenomena yang tidak bisa diabaikan oleh *stakeholder* diluar TNI [1]. Pentingnya pertahanan saat inilah yang mendorong banyaknya teknologi konvensional yang berangsur berubah menjadi modern. Mulai dari sarana dan prasarana keamanan yang dibutuhkan untuk menjaga keamanan di Indonesia. Karena banyak aspek yang harus dilindungi di dalam sebuah negara, yang ditulis dalam UU RI No. 3 tahun 2002 pasal 1 ayat 1 dan 2 tentang pertahanan negara[1]. Inilah landasan yang jadi perhatian bagi negara untuk memerhatikan sarana dan prasarana satuan keamanan di Indonesia agar ditingkatkan baik dari SDM dan juga dengan berbagai persenjataan dengan teknologi mutakhir.

Untuk kebutuhan pertahanan PT. Penataran Angkatan Laut (PAL) Indonesia adalah salah satu instansi yang terus meningkatkan dan meng-*upgrade* alutsista bagi kebutuhan pertahanan di Indonesia[2]. PT. PAL memproduksi berbagai macam kapal, mulai dari kapal perang angkatan laut dan kapal dagang, seperti kapal tipe Fregat, kapal Korvet, kapal Selam, kapal cepat rudal dan kapal patroli. Pada kapal perang angkatan laut yang di produksi oleh PT. PAL Indonesia diperlengkapi dengan berbagai jenis senjata untuk mendukung fungsi dari kapal tersebut sebagai pertahanan di daerah perairan Indonesia, seperti senjata OTO Melara 76 mm, *Twin* simbad SAM, 20 mm *Denel Vektor* G12, *turret gun* dan masih banyak lagi.

Salah satu contoh senjata yang paling populer digunakan pada kapal perang angkatan laut adalah *turret gun*. *Turret gun* adalah sistem senapan yang dapat bergerak untuk menembak target dengan pergerakan arah dan sudut yang mengikuti pergerakan target[3]. *Turret gun* mengalami modernisasi yang pesat untuk memperkuat fungsinya dalam pertahanan pada zaman berkembangnya teknologi. Mulai dari konvensional yang dikendalikan manusia hingga secara otomatis atau dengan *remote control* untuk melindungi operator *turret gun*[3]. Upaya dari modernisasi dari *turret gun* ini untuk mengurangi tingkat kecelakaan di medan perang operator *turret gun* tersebut. Upaya dari modernisasi dari *turret gun* ini untuk mengurangi tingkat kecelakaan di medan perang operator *turret gun* tersebut.



Iniilah yang membuat *turret gun* semakin sering digunakan dan di *upgrade* fungsi serta sistem kerjanya, agar dapat selalu optimal dalam fungsinya.

Pada kapal perang milik angkatan laut, *turret gun* dapat bergerak pada sumbu azimuth[4]. Besar kecilnya dimensi senapan bergantung pada ukuran (kaliber) peluru. Semakin besar peluru maka semakin besar pula target yang serang. Kecepatan tembak dari *turret gun* tersebut justru semakin berkurang. Faktor lain yang disebabkan oleh semakin besarnya peluru juga berpengaruh pada kestabilan senjata *turret gun*. Untuk meminimalisir gangguan dan kelemahan pada *turret gun* inilah dibutuhkan pengendali yang baik. Beberapa penelitian sudah pernah dilakukan untuk terus mengurangi kekurangan dari sistem *turret gun*, seperti penelitian mengenai pengendalian sumbu elevasi pada *turret-gun* dengan kaliber 20 mm. Penelitian ini membahas tentang penggunaan pengendali PID dengan metode *root locus* dan *ziegler nichols*. Pada hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem *overshoot* sebesar 12,8% dan stabil [4]. Dari hasil simulasi yang didapat, kerja dari *turret gun* tidak maksimal dikarenakan *overshoot* yang tinggi dapat menurunkan akurasi dari tembakan senjata sehingga tingkat target kena sasaran lebih rendah atau kecil.

Penelitian selanjutnya yaitu pengendalian pada sumbu *azimuth* pada *turret gun* dengan kaliber 20 mm. Pada penelitian ini menggunakan pengendali PID dengan metode *root locus* dan *ziegler nichols*. Hasil penelitian menunjukkan sistem *turret gun* *overshoot* sebesar 19,9%[3]. Pada penelitian ini memiliki waktu capai stabilnya memang cepat dan *overshoot* nya sangat tinggi yang dapat mempengaruhi target sasaran. Berikutnya penelitian dengan merancang pengendali *robust* dan *turret gun*. Berdasarkan penelitian ini, menunjukkan hasil respon yang lebih bagus daripada penelitian sebelumnya. Dengan menggunakan pengendali LQR dan metode *Frequency Shaped* sehingga jadi FSLQR (*Frequency Shaped linear quadratic regulator*) menunjukkan nilai respon sistem yang lebih stabil[5]. Tapi pada penelitian ini diperlukan metode untuk mengatur parameter utama yaitu R dan Q untuk pengendali LQR dengan parameter Qf dan Rf. Karna pada percobaan, jika sistem diberi beban 5% sistem tidak mampu bekerja dengan baik, sehingga menghasilkan osilasi. Maka dari itu nilai dari empat parameter belum optimal.

Dari beberapa penelitian di atas yang dirancang untuk sistem *turret gun* memiliki kelemahan pada sistem ini. Terbukti dari adanya *overshoot* dan osilasi, sehingga sistem tidak stabil dikarenakan adanya beban yang dapat berganti. Maka dari itu, dibutuhkan pengendali yang mampu mengatasi masalah tersebut. Pengendali *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) dipilih untuk mengatasi yang ada pada sistem *turret gun*. LQG muncul sebagai pengembangan kendali optimal metode LQR. LQG adalah penambahan LQR dengan estimator yang optimal



berupa suatu filter yang biasa disebut dengan *Kalman Filter*[6]. Fungsi dari Kalman filter sendiri adalah untuk menyaring *noise* dalam bentuk sinyal *Gaussian*. Maka dari itu pada tahun 1970, konsep pengendali tersebut diberi nama dengan *Linear Quadratic Gaussian (LQG)*. Artinya pengendali LQG memang dirancang untuk mengatasi gangguan, noise yang terdapat pada sistem, karena dilengkapi dengan filter. Berikut beberapa Penelitian yang menunjukkan keunggulan LQG dari segi penanggulangan gangguan dan noise. Penelitian yang dilakukan Prayunanta Ahusda Katherin Indriawati di ITS menunjukkan keunggulan dan performansi dari LQG, Tentang penerapan kendali optimal LQG pada sistem kendali *Cascade PI&P* menyebabkan pengurangan variabilitas *temperature steam* dan menaikkan performansi *Integral Absolute Error (IAE)*. Pada penelitian ini, LQG dapat mempertahankan rata-rata temperatur *steam* sebesar 490.045°C . Saat dilakukan penurunan beban parameter input yang berupa *temperature steam input*. LQG juga mampu mengoptimalkan nilai performansi dari *Integral Absolute Error (IAE)* dari 0.708859 menjadi 0.463045[7]. dari penelitian ini dapat dilihat bahwa pengendali mampu mempertahankan performansi saat diberikan gangguan.

Penelitian berikutnya dilakukan Dinayati Rodliyah di ITS. Pada penelitian ini membuktikan bahwa kapal FPB (*Fast Patrol Boat*) 38 dapat dikendalikan dengan menggunakan LQG. Dan juga diuji dengan gangguan perubahan arah *sway* dan *yaw* pada set point 20 dengan overshoot 6.108 meter dan settling time 15.71 second[8]. Berdasarkan penelitian ini, membuktikan bahwa kendali LQG dapat mengatasi gangguan dan noise pada sistem *turret gun*.

Selanjutnya, penggunaan sebuah metode *Integral Absolut Error (IAE)* untuk mengetahui seberapa besar *error system* yang terjadi pada saat simulasi dilakukan. Metode penelitian ini dilakukan oleh A.M. Lopez, J.A. Miller, C.L. Smith dan P.W. Murtil yang berjudul *Tuning Controllers with Error-Integral Criteria*. Dalam penelitian ini menjelaskan bahwa metode IAE dapat mengoptimalkan respon dari gangguan pada proses *close loop* dengan menunjukkan nilai performansi error sistem saat disimulasikan. Berdasarkan penelitian inilah membuktikan metode IAE mampu menunjukkan hasil nilai *error performansi* sistem[20].

Selain penelitian diatas, alasan memilih *turret gun* sebagai *plant* yang ingin dikendalikan pada penelitian ini adalah karna ingin melanjutkan penelitian pada proyek mini saya yang hanya membahas analisa respon *system* tentang pengendalian *turret gun* secara *open loop* pada sumbu azimuth yang masih memiliki kekurangan. Seiring perkembangan



zaman ini, *turret gun* menjadi salah satu senjata pertahanan yang terus dikembangkan kemampuannya untuk menjadi lebih baik. Oleh karena itu peneliti mengangkat penelitian ini.

Berdasarkan uraian latar belakang di atas dengan keunggulan pengendali *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) yang mampu menjaga kestabilan terhadap gangguan dan menghasilkan nilai keluaran yang optimal. Maka pada penelitian ini akan dirancang pengendali LQG untuk mengendalikan *Turret gun*. Oleh karena itu penulis tertarik melakukan penelitian dengan mengambil tugas akhir tentang **“Desain Kendali Optimal *Linear Quadratic Gaussian* (LQG) Untuk Sistem *Turret Gun* Dengan Pengujian Pada Sumbu Azimuth”**.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan sebelumnya, permasalahan pada penelitian ini adalah :

1. Apakah pengendali *Linear Quadratic Gaussian* mampu mempercepat sistem *turret gun* dalam mencapai *setpoint* pada saat disimulasikan?
2. Bagaimana pengaruh pengendali *Linear Quadratic Gaussian* terhadap respon sistem *turret gun* ?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang pengendali LQG agar sistem *turret gun* mampu dengan cepat mencapai *setpoint* pada saat di simulasikan pada pengujian sumbu azimuth

1.4 Batasan Masalah

Pembahasan penelitian ini dilakukan dengan batasan masalah sebagai berikut :

1. Sistem yang dikendalikan adalah *turret gun* dengan arah sumbu azimuth
2. Tidak membahas pengaruh perubahan parameter dari sistem *turret gun*
3. Hanya menggunakan aplikasi Matlab dalam melakukan simulasi
4. Tidak membahas hardware

1.5 Manfaat Penelitian

1. Menjadi referensi tambahan untuk penelitian penelitian berikutnya
2. Dapat memberikan pengetahuan tentang perancangan pengendali LQG pada sistem *turret gun*
3. Menghasilkan rancangan pengendalian sumbu azimuth menggunakan pengendali LQG



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian terkait

Pada penelitian tugas akhir ini akan dilakukan studi literatur untuk mendapatkan teori atau referensi yang relevan dengan kasus dan permasalahan yang akan diselesaikan, teori dan referensi tersebut bisa didapatkan dari berbagai sumber seperti jurnal, *paper*, buku dan sumber lainnya.

Ada beberapa penelitian terkait yang telah dilakukan untuk mengatasi masalah yang ada pada *turret gun*, salah satunya yakni penelitian mengenai untuk pengendali sumbu azimuth pada *turret gun* kaliber 20 milimeter[3]. Penelitian ini membahas tentang dimensi dari *turret gun*, karna hubungan dimensi *turret gun*, kaliber dan masa dari *turret gun* sangatlah penting dalam perancangan alat tempur. Karna efeknya akan berpengaruh pada pengendalian dari *turret gun* yang akan sulit dikendalikan, oleh karna itu harus disesuaikan dengan kebutuhan dari pengguna. Untuk mengatasi hal ini, pengendali PID dipilih untuk mengatasi masalah *turret gun*. setelah melakukan *control* dengan PID dengan metode tuning, maka didapatkan nilai *gain* proporsional dan derivatif untuk mendapatkan hasil respon yang memenuhi kriteria perancangan sebesar 925.47 dan 173.83[3]. Dari penelitian ini peneliti melakukan riset pada sumbu azimuth yang sama namun dengan metode pengendali berbeda untuk mendapatkan hasil perbandingan yang lebih baik dari penelitian ini.

Selanjutnya penelitian dilakukan oleh dimas kunto dkk untuk pengendalian sumbu elevasi pada *turret gun* kaliber 20 milimeter. Penelitian ini membahas parameter dan mekanisme pada *turret gun*. Dalam penelitian ini menggunakan pengendali PID dengan metode *root locus* dan *ziegler nichols*. Hasil penelitian menunjukkan metode *root locus* menghasilkan K_p sebesar 4132.0457, K_i sebesar 375.678 dan K_d sebesar 881. Sedangkan dengan metode *ziegler nichols* menghasilkan nilai K_p , K_i dan K_d berturut-turut sebesar 23061.024, 37820.07 dan 3515.4. Dari kedua metode ini, menghasilkan keadaan yang baik dan mencapai setpoint dalam keadaan stabil. Namun masih memiliki *overshoot* sebesar 12.8% dan *setling time* pada detik 1.7 detik [4]. Pada penelitian ini memiliki perbedaan pengujian pada sumbunya dengan peneliti. Jadi tidak membandingkan hasil pengujian pada sumbu azimuth dan elevasi. Kesamaan parameter *turret gun* yang digunakan bagi peneliti dari sumber referensi berikut.



Penelitian selanjutnya dilakukan oleh alisia rohelita untuk pengendalian sumbu azimuth pada sistem *turret gun*. dari penelitian ini peneliti melakukan riset dengan penambahan pengendali LQR pada sistem *turret gun*. Hasil penelitian menunjukkan sistem *turret gun* mampu menghasilkan respon *rise time* sebesar 16.87 detik *delay time* 7.80 detik dan *setling time* 30.68 detik. Dari hasil penelitian ini pengendali sudah mampu mempercepat sistem *turret gun* mencapai *setpoint*nya. [21] Dari hasil penelitian ini, peneliti mengambil perbandingan hasil respon sistem LQR dengan LQG yang di ujikan pada sumbu azimuth.

Selanjutnya penelitian tentang pengendali LQG adalah pengendalian posisi *magnetic levitation ball*. Hasil dari penelitian ini menjelaskan bahwa pengendali mampu bekerja optimal untuk nilai performansi dari *Integral Absolute Error* (IAE) sebesar $4.161e^{-005}$, dengan *rise time* yang cepat sebesar 0.033 dari waktu simulasi 3 detik. Pada saat diuji dengan memberikan gangguan *Gaussian* nilai tetap stabil walaupun terdapat nilai Ess sebesar 0.0222 detik yang terjadi pada detik ke 2[9]. Dari Penelitian ini membuktikan bahwa LQG mampu untuk mempertahankan respon sistem saat diberi gangguan. Setelah melihat hasil sistem dikendalikan dengan LQG peneliti membuktikan dengan percobaan pada sistem *turret gun*. Dan hasilnya LQG mampu memperbaiki hasil respon sistem dari *turret gun*.

Penelitian lainnya mengenai pengaturan temperature *steam* pada *superheater* menggunakan pengendali LQG. Dari penelitian ini menunjukkan bahwa LQG dapat mempertahankan rata rata temperatur alat sebesar 490.045°C saat dilakukan penurunan beban parameter input yang berupa temperatur *steam input*. LQG juga bisa mengoptimalkan performansi dari *Integral Absolute Error* (IAE) dari 0.708859 menjadi 0.463045 [7]. Dari penelitian ini didapatkan bahwa LQG dapat memperbaiki nilai respon waktu yang lama pada sistem. Lalu peneliti mecoba pada sistem *turret gun* saat sistem diberikan *setpoint* menunjukkan hasil respon yang stabil pada hasil akhir nya.

Berdasarkan hasil riset sistem *turret gun* pada sumbu azimuth dengan pengendalian *Linear Quadratic Gaussian* oleh peneliti, maka didapatkan kebaharuan metode pengendalian yang mampu mengendalikan sistem *turret gun* pada sumbu azimuth dengan cara simulasi. Metode dengan pengendalian LQG mampu menghasilkan respon sistem yang cepat mencapai setpoint dan tidak memiliki error steady state.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengertian Turret Gun

Turret gun adalah sebuah manipulator robot berbentuk *rifle* yang dapat dipindahkan ke target dengan gerakan arah dan sudut sesuai target[10]. *Turret gun* mampu bergerak pada

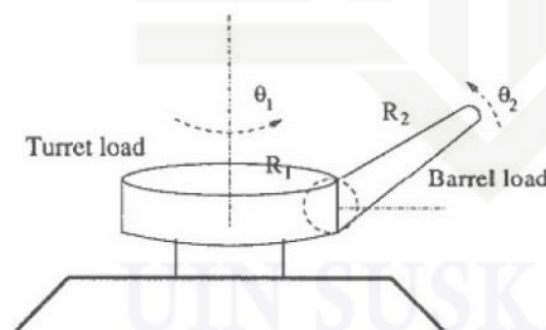


sumbu azimuth untuk memutar senjata *turret* dan sumbu elevasi untuk menaikkan atau menurunkan *turret* sesuai dengan target yang dikunci. Pengoperasian *turret gun* dilakukan secara bergantian pada sumbu rotasinya. *Turret gun* dapat dipasang pada alat tempur dan juga pada bangunan menara. Faktor yang harus diperhatikan pada saat penggunaan *turret gun* ketetapan target dan kecepatan untuk membidik target.

Pergerakan terhadap sumbu elevasi dan *azimuth* pada *turret-gun* terbagi menjadi komponen kinematika dan dinamika[11]. Faktor kinematika pada *turret-gun* adalah pergerakan (lintasan) posisi sistem mekanik yang berbasis transformasi koordinat tanpa memperhitungkan massa atau gaya-gaya yang bekerja pada sistem mekanik. Sedangkan faktor dinamika pada *turret-gun* adalah komponen massa dan gaya yang mempengaruhi *turret gun*. Kenaikan massa sistem berpengaruh dengan kenaikan torsi dan inersia. Semakin besar massa sistem, maka torsi dan inersia sistem semakin besar. Faktor dinamika sistem pada *turret gun* menyebabkan permasalahan dalam menentukan metode kontrol yang sesuai untuk *turret gun* karena sistem kontrol sangat mempengaruhi desain kendali untuk *turret*

2.2.2 Pemodelan Turret Gun

Menurut tujuan dan kondisi operasi, sebuah pemodelan sangat penting untuk menemukan keseimbangan antara kesederhanaan dan kerumitan model, namun harus mempertimbangkan relevansi sup proses dalam sistem. Dalam pemodelan sistem dinamis biasanya banyak perhitungan yang harus dilakukan sebelum model tersebut diperoleh, oleh karena itu diperlukan pendekatan lain yang dipertimbangkan dan beberapa bagian harus diasumsikan.



Gambar 2.1 Sistem *Turret* dan *Gun* [4].

Gambar 2.1 mengilustrasikan sistem *Turret* dan *Gun*. *Turret* adalah komponen yang memiliki pergerakan sumbu *azimuth* memutar sebesar 360° [4]. Pada komponen ini memiliki parameter yaitu radius, massa dan posisi angular. Berdasarkan gambar 2.1 dilihat bahwa sistem memiliki 2 beban yaitu beban *turret* dan beban laras pada *gun*, dengan setiap beban



didorong oleh roda gigi yang mempunyai *backlash*. Dengan m_1 sebagai massa beban, R_1 sebagai jari-jari, dan θ_1 merupakan posisi sudut pada *turret*. Kemudian m_2 sebagai massa beban, R_2 sebagai jari-jari, dan θ_2 adalah posisi sudut pada *gun*[4].

Berdasarkan gambar 2.1 dilihat bahwa sistem memiliki 2 beban yaitu beban *turret* dan beban laras pada *gun*, dengan setiap beban didorong oleh roda gigi yang mempunyai *backlash*. Dengan m_1 sebagai massa beban, R_1 sebagai jari-jari, dan θ_1 merupakan posisi sudut pada *turret*. Kemudian m_2 sebagai massa beban, R_2 sebagai jari-jari, dan θ_2 adalah posisi sudut pada *gun*[3].

Model dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan Euler-Lagrange [12]. Dimana L adalah energi kinetik total dikurangi energi potensial total pada sistem, maka $L = EK_{total} - EP_{total}$. Dengan *turret* dianggap rigid dan pejal berupa silinder yang diputar pada pusat lingkaran (memutar), *gun* dianggap rigid dan pejal berupa silinder yang diputar di ujung silinder sebagai poros putar seperti pada gambar 2.1. Karena sistem bergerak rotasional dengan dua pergerakan sehingga energi kinetik totalnya adalah energi kinetik saat.

memutar dan gerak *gun* keatas dan kebawah. Sedangkan energi potensialnya hanya terdapat pada gerakan *gun*. Energi kinetik sistem sebagai berikut :

$$EK_{total} = EK_{turret} + EK_{gun} \quad (2.1)$$

$$= \frac{1}{2}I(\dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2}I(\dot{\theta}_2)^2 \quad (2.2)$$

$$EK_{total} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right) (\dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3}m_2R_2^2 \right) (\dot{\theta}_2)^2 \quad (2.3)$$

$$EP_{total} = \frac{1}{2}m_2gR_2 \cos(\theta_2) \quad (2.4)$$

Dari Persamaan (2.3) dan (2.4) diperoleh :

$$L = EK_{total} - EP_{total} \quad (2.5)$$

$$= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right) (\dot{\theta}_1)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{3}m_2R_2^2 \right) (\dot{\theta}_2)^2 - \frac{1}{2}m_2gR_2 \cos(\theta_2) \quad (2.6)$$

Persamaan gerak dinamik sistem *turret-gun* bisa diperoleh dengan substitusi persamaan (2.6) ke persamaan Euler-Lagrange :

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = \left(\frac{1}{2}m_1R_1^2 + m_2R_1^2 + m_2R_1R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3}m_2R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right) (\dot{\theta}_1) \quad (2.8)$$



$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} =$$

$$\left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right) (\ddot{\theta}_1) \left(-m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 - \frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_2 \right) \dot{\theta}_1 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0 \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \left(\frac{1}{3} m_2 R_2^2 \right) \dot{\theta}_2 \quad (2.11)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = \left(\frac{1}{3} m_2 R_2^2 \right) \ddot{\theta}_2 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = \frac{1}{2} \left(-m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2) - \frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} m_2 g R_2 \cos(\theta_2) \right) \quad (2.13)$$

Diperoleh :

$$\tau_1 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} - \frac{\partial L}{\partial \theta_1} \quad (2.14)$$

$$\tau_1 = \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right) (\ddot{\theta}_1) + \left(-m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 - \frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_2 \right) \dot{\theta}_1 - 0 \quad (2.15)$$

$$\tau_2 = \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} - \frac{\partial L}{\partial \theta_2} \quad (2.16)$$

$$\tau_2 = \left(\frac{1}{3} m_2 R_2^2 \right) \ddot{\theta}_2 - \frac{1}{2} \left(-m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2) - \frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_1 + \frac{1}{2} m_2 g R_2 \cos(\theta_2) \right) \quad (2.17)$$

Maka dengan metode Lagrangian [12] persamaan gerak dinamikny adalah sebagai berikut :

$$D(\theta) \ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta}) \dot{\theta} + G(\theta) = \tau \quad (2.18)$$

Dengan:

- τ = Torsi sistem
- $D(\theta)$ = Matriks Inersia
- $C(\theta, \dot{\theta})$ = Vektor gaya koriolis dan sentrifugal
- $G(\theta)$ = Gaya gravitasi

Sehingga Persamaan (2.15) dan (2.17) menjadi :

$$\begin{bmatrix} D_{11} & 0 \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ G_{21} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Dimana :

$$G_{21} = \frac{1}{2} m_2 g R_2 \cos(\theta_2) \quad (2.20)$$

$$D_{11} = \frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos \theta_2 + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \quad (2.21)$$



$$D_{22} = \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \quad (2.22)$$

$$C_{11} = -m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2 \quad (2.23)$$

$$C_{12} = \left(-\frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_1 \right) \dot{\theta}_2 \quad (2.24)$$

Dengan

$$C_{21} = \left(\frac{1}{2} m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2) + \frac{1}{6} m_2 R_2^2 \sin(\theta_2) \right) \dot{\theta}_1^2 \quad (2.25)$$

θ_1 = Sudut Azimuth

θ_2 = Sudut Elevasi

m_1 = Massa Turret

m_2 = Massa Gun

R_1 = Jari-jari Turret

R_2 = Jari-jari Gun

G = Gaya gravitasi yang dialami sistem

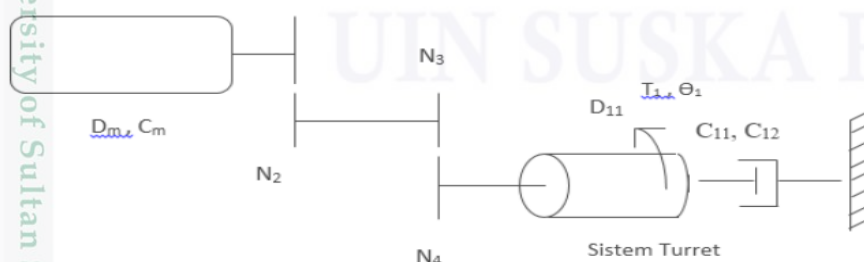
Sistem dinamik tersebut merupakan jumlah dari torsi yang terdapat pada sistem *turret-gun*.

Persamaan tersebut kemudian menjadi:

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{\tau_1 - C_{11}\dot{\theta}_1 - C_{12}\dot{\theta}_2}{D_{11}} \quad (2.26)$$

Persamaan (2.26) menunjukkan bahwa perubahan kecepatan pada *turret* berbanding lurus dengan torsi yang dialami pada *turret* dikurangi dengan efek gaya koriolis, dan sentripetal pada *turret* yang telah dibagi inersia *turret*. Hal yang sama juga berlaku pada komponen *gun*, namun komponen *gun* juga dipengaruhi oleh gaya gravitasi, sehingga perubahan kecepatan pada *gun* berbanding lurus dengan torsi yang dialami pada *gun* dikurangi dengan efek gaya koriolis dan sentrifugal, serta gaya gravitasi yang terdapat pada *gun* dan dibagi dengan properti inersia dari komponen *gun*.

2.2.3 Motor DC untuk kendali sumbu Azimuth pada Turret Gun



Gambar 2.2 Free body diagram sistem azimuth[3]



Pada pemodelan sistem kendali sumbu *azimuth turret gun* dengan menggunakan *servo motor* DC sebagai penggerak utamanya, pertama harus diketahui terlebih dahulu hubungan antara torsi yang keluar dari motor dengan torsi yang masuk ke dalam sistem. Torsi yang akan masuk ke dalam sistem merupakan torsi keluaran motor yang telah dipengaruhi oleh transmisi roda gigi:

$$T_{motor} \times N = T_{sistem} \quad (2.27)$$

N merupakan rasio roda gigi keseluruhan pada transmisi penggerak yang dianggap sebagai model transmisi *lossless gear*, sehingga hanya memperhatikan faktor rasio roda gigi. Besar torsi yang dibutuhkan sistem adalah sebagai berikut :

$$T_{sistem} = D_{11}\ddot{\theta}_1 + C_{11}\dot{\theta}_1 + C_{12} \quad (2.28)$$

Dengan :

D_{11} = Inersia sistem turret

C_{11} = Konstanta damping sistem turret

C_{12} = Efek koriolis gun terhadap turret

T_{sistem} = Torsi sistem *azimuth*

$\dot{\theta}_1$ = Perubahan kecepatan sistem *azimuth*

$\ddot{\theta}_1$ = Perubahan percepatan sistem *azimuth*

Selanjutnya adalah mendefinisikan pengaruh dari tegangan yang masuk ke dalam motor dengan torsi yang ditimbulkan akibat tegangan tersebut. Hubungan antara *armaturecurrent* $I_a(t)$, *armaturevoltage*, $E_a(t)$, dan *backelectromotiveforce* $V_b(t)$ dituliskan pada persamaan motor DC sebagai berikut :

$$R_a I_a(t) + L_a \dot{I}_a(t) + V_b(t) = E_a(t) \quad (2.29)$$

Dimana *back electromotive force* dirumuskan sebagai :

$$V_b(t) = K_b \dot{\theta}_1(t) \quad (2.30)$$

Torsi yang dihasilkan oleh motor adalah sebanding dengan arusnya, sesuai dengan persamaan:

$$T_m(t) = K_t I_a(t) \quad (2.31)$$

$$I_a(t) = \frac{1}{K_t} T_m(t) \quad (2.32)$$

K_t adalah konstanta torsi dari motor DC (*motor torque constant*). Untuk mendapatkan *transfer function* dari motor, maka persamaan (2.32) dan (2.30) disubstitusikan ke dalam persamaan (2.29) menghasilkan :

$$\frac{(R_a + L_a) T_m(t)}{K_t} K_b \dot{\theta}_1(t) = E_a(t) \quad (2.33)$$



Ruas kiri dan kanan pada persamaan (2.33) dipindahkan, selanjutnya diperoleh hubungan antara torsi keluaran motor $T_m(t)$ dengan tegangan masukan $E_a(t)$, yaitu :

$$T_m(t) = \frac{K_t(E_a(t) - K_b \dot{\theta}_1(t))}{R_a} \quad (2.34)$$

Setelah masing-masing persamaan torsi telah diketahui, persamaan (2.27) dan (2.33) dimasukkan ke dalam persamaan (2.28) untuk mendapatkan hubungan antara tegangan yang masuk ke motor dengan torsi yang masuk ke dalam sistem :

$$T_{motor} \times N = T_{sistem}$$

$$\frac{K_t(E_a(t) - K_b \dot{\theta}_1(t))}{R_a} \times N = D_{11} \ddot{\theta}_1 + C_{11} \dot{\theta}_1 + C_{12} \dot{\theta}_2 \quad (2.35)$$

$$E_a = \frac{R_a(D_{11} \ddot{\theta}_1 + C_{11} \dot{\theta}_1 + C_{12} \dot{\theta}_2) + N K_t K_b \dot{\theta}_1}{N K_t} \quad (2.36)$$

Dengan :

$$D_{11} = \frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2)$$

$$C_{11} = (-m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2) \dot{\theta}_2)$$

$$C_{12} = -\frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_1$$

2.2.4 Model Matematika Turret Gun

Persamaan (2.37) merupakan persamaan sistem dengan kondisi nonlinear. Agar sistem tersebut dapat dilinearisasi, persamaan (2.37) harus diubah ke dalam bentuk $\ddot{\theta}_1$ terlebih dahulu. Parameter D_{11} , C_{11} dan C_{12} dimasukkan ke dalam persamaan (2.37) serta ruas kiri dan kanan dipindahkan, diperoleh bentuk $\ddot{\theta}_1$ sebagai berikut :

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{K_t E_a N - (N K_t K_b + R_a C_{11}) \dot{\theta}_1 - R_a C_{12} \dot{\theta}_2}{R_a D_{11}}$$

$$\ddot{\theta}_1 = \frac{K_t E_a N + [(R_a m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_2 - N K_t K_b] \dot{\theta}_1}{R_a (\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2))} \quad (2.38)$$

Persamaan (2.19) merupakan persamaan bentuk non-linear. Persamaan ini harus dilinearisasi terlebih dahulu sebelum dilakukan uji keterkontrolan dan keteramatan. Metode linearisasi yang digunakan adalah metode *Jacobian*.

Misal:

$$x_1 = \theta_1$$

$$x_2 = \dot{x}_1 = \dot{\theta}_1$$

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (2.39)$$



$$\dot{x}_2 = \frac{K_t E_a N + \left[(R_a m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_2 - N K_t K_b \right] \dot{x}_2}{R_a \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right)} \quad (2.40)$$

Persamaan (2.19) dan (2.21) merupakan persamaan diferensial non-linear yang akan diubah menjadi persamaan linear dengan menggunakan metode *Jacobian* pada sekitar titik kesetimbangannya. Titik setimbang merupakan pendekatan pada saat kondisi sistem sudah tidak berubah lagi, yang dirumuskan sebagai :

$$f_1(x_1, x_2) = x_2 = 0 \quad (2.41)$$

$$f_2(x_1, x_2) = \frac{K_t E_a N + \left[(R_a m_2 R_1 R_2 \sin(\theta_2)) + R_a \frac{1}{3} m_2 R_2 R_2^2 \sin(2\theta_2) \dot{\theta}_2 - N K_t K_b \right] \dot{\theta}_1}{R_a \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right)} \quad (2.42)$$

Dilihat dari sistem *turret*, x_1 dan x_2 masing-masing menunjukkan posisi dan kecepatan turret.

Di manapun posisi *turret*, *turret* akan setimbang karena $x_2 = 0$ atau pada saat *turret* tidak bergerak.

$$J(\bar{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial x_1} & \frac{\partial F_1}{\partial x_2} \\ \frac{\partial F_2}{\partial x_1} & \frac{\partial F_2}{\partial x_2} \end{pmatrix} \quad (2.43)$$

Persamaan (2.43) merupakan persamaan untuk matriks *Jacobian*, dimana \bar{x} adalah titik kesetimbangan dari sistem. Linearisasi di sekitar titik kesetimbangan menjadi sebagai berikut:

$$J(\bar{x}) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-N K_t K_b}{R_a \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right)} \end{pmatrix} \quad (2.44)$$

Persamaan (2.44) merupakan matriks A untuk model *state-space* $\dot{x} = Ax + Bu$ dan $y = Cx + Du$. Cara yang sama digunakan untuk menentukan matriks B, C dan D sehingga diperoleh matriks berikut :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-N K_t K_b}{R_a \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right)} \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{K_t E_a N}{R_a \left(\frac{1}{2} m_1 R_1^2 + m_2 R_1^2 + m_2 R_1 R_2 \cos(\theta_2) + \frac{1}{3} m_2 R_2^2 \cos^2(\theta_2) \right)} \end{pmatrix} \quad (2.46)$$

$$C = (1 \quad 0) \quad (2.47)$$

$$D = (0) \quad (2.48)$$

Tabel 2.1 Nilai-nilai parameter dari *Turret-gun*[3].



Parameter	Simbol	Nilai
Massa <i>turret</i>	m_1	1500 kg
Massa <i>gun</i>	m_2	110 kg
Radius <i>turret</i>	R_1	0.5 m
Panjang <i>gun</i>	R_2	2.76 m
Rasio Transmisi	N	1/200
Voltage constant Motor	K_b	7.5 V/Krpm
Torque constant Motor	K_t	0.072 Nm/A
Armature Resistance	R_a	0.45 ohm

Diasumsikan posisi *gun* diam ($\dot{\theta}_1 = 0^\circ$) pada posisi $\theta_1 = 0^\circ$. Setelah mensubstitusikan nilai-nilai parameter dari *Turret-gun* dari tabel 2.1 menjadi :

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & \frac{-0.027}{0.45(0.01511)} \end{pmatrix} \quad (2.49)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.3971 \end{pmatrix} \quad (2.50)$$

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0.0036 E_a \\ 0.45(0.0529) \end{pmatrix} \quad (2.51)$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 0.0036 \\ 0.45(0.0529) \end{pmatrix} E_a \quad (2.52)$$

$$C = \begin{pmatrix} 1 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.53)$$

$$D = \begin{pmatrix} 0 \end{pmatrix} \quad (2.54)$$

Sehingga didapat persamaan steady state untuk persamaan linear *turret gun* adalah:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.39707 \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05294 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

Maka didapat persamaan transfer function :

$$G(s) = \frac{\theta_s}{U_s} \quad (2.59)$$

$$G(s) = \frac{0.05294}{s^2 + 0.3971 s} \quad (2.60)$$

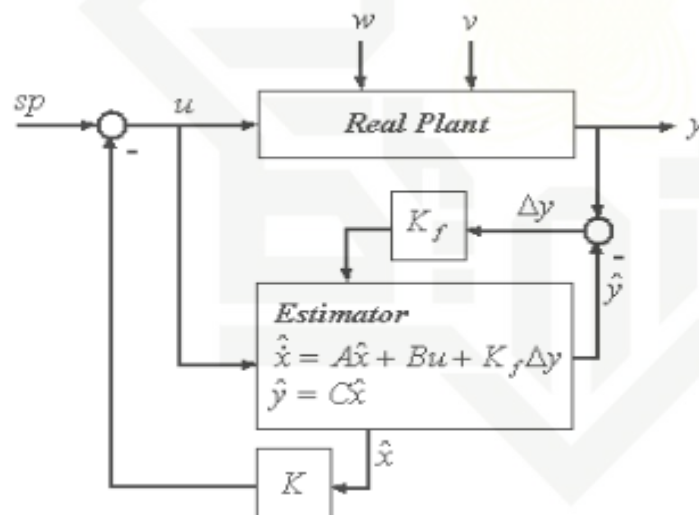


2.3. Pengendali Optimal *Linear Quadratic Gaussian* (LQG)

Kendali optimal linear quadratic gaussian (LQG) didefinisikan sebagai teknik kendali modern yang diimplementasikan dalam bentuk ruang dan waktu (state space) yang digunakan untuk mendesain dinamik optimal regulator. Pada perjalanan perkembangan konsep, Linear Quadratic Regulator (LQR) mengalami pengembangan yaitu dengan menambahkan estimator optimal (Filter Kalman)[6]. Kalman filter adalah filter yang handal untuk mengeleminasi noise, noise yang terdapat didalam LQG adalah *Gaussian white noise*. *Gaussian white noise* (noise yang dibangkitkan dari alam) sangat berpengaruh pada respon sistem[13]. Konsep pengembangan itu diperkenalkan pada tahun 1970 dengan nama Linier Quadratic Gaussian (LQG). Pada konsep LQG diperkenalkan konsep teori pemisahan (separation theorem) atau sering disebut Certainty Equivalence Principle. Dari hasil tersebut penguatan umpan balik dan filter dalam LQG dirancang secara terpisah[6].

Model *state space* :

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + Bu + v(t) \\ y &= Cx + w(t)\end{aligned}\quad (2.61)$$



Gambar 2.3 Diagram Blok LQG [6]

Keterangan:

u = Sinyal Kendali Input;

y = Output Proses;

w = Gangguan Proses;

v = Gangguan Pengukuran (*white noise*);

A = Matrik *Plant*;



B = Matrik Kendali Input;

C = Matrik Pengukuran;

K = Penguatan Umpan Balik (*Regulator*);

K_f = Penguatan *Filter Kalman*.

Penerapan umpan balik optimal dapat dinyatakan dalam bentuk blok diagram. Dari gambar diatas terlihat bahwa untuk mencari sinyal kontrol optimal u diperlukan penguatan kontroler K dan penguat estimator kalman K_f yang optimal. Untuk menjaga sistem tetap stabil, diperlukan pengendali dan estimator yang stabil. Menurut teorema pemisahan bahwa harga K dan K_f dapat diperoleh secara terpisah. pencarian harga K dilakukan seolah olah sistem bersifat deterministic, yaitu dengan metode LQR. Sementara itu, pencarian nilai K_f optimal dilakukan dengan sistem bersifat stokasti, yaitu indeks performansi variansi kesalahan minimum atau dituliskan[6].

$$J(\bar{x}_0) = \frac{1}{2} S(T) x^2(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T (Qx^2 + Ru^2) \quad (2.62)$$

Besarnya harga penguat regulator adalah:

$$K = R^{-1} B^T S \quad (2.63)$$

Untuk mencari besarnya S dapat menggunakan persamaan Ricatti:

$$A^T S + SA - SBR_c^{-1} B^T S + Q_c = 0 \quad (2.64)$$

dengan asumsi : $Q_c \geq 0, R_c > 0$

Q menentukan matrik keadaan dan R menentukan matrik kendali. Sehingga sinyal kendali (u) dalam kendali LQR (*state feedback*) adalah:

$$u = -Kx \quad (2.65)$$

Kalman filter merupakan estimator optimal yang berfungsi mengestimasi variabel keadaan dan menyaring *noise* (derau). Prinsip kerja estimator berdasarkan sifat rekursif, yaitu optimisasi yang dilakukan adalah dengan menekan harga *error* kovarian sekecil mungkin.

Maka, indeks performansinya atau *cost function*-nya dapat ditulis:

$$J = E\{[\dot{x} - \hat{x}]^T [\dot{x} - \hat{x}]\} \quad (2.66)$$

\hat{x} adalah harga estimasi dari variabel x dalam fungsi waktu. Estimasi variabel keadaan optimal \hat{x} diperoleh dari sistem dinamik *filter kalman* sebagai berikut:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_f(y - \hat{y}) \quad (2.67)$$

Sedangkan untuk menentukan penguatan filter kalman pada estimator adalah:

$$K_f = PC^T R_f^{-1} \quad (2.68)$$



Matrik P diperoleh dari persamaan *Riccati* sebagai berikut :

$$0 = PA^T + AP - PC^T R_f^{-1} CP + GQ_f G^T \quad (2.69)$$

Dengan asumsi-asumsi matrik A dan B terkendali, dan C teramati $Q_f \geq 0$, $R_f > 0$, maka filter kalman dijamin stabil asimtotik. Matrik Q_f dan R_f adalah noise *covariance*, dengan noise proses $w(t) \sim (0, Q_f)$ dan pengukuran $n(t) \sim (0, V^2 R_f)$ adalah *white noise*[14].

2.2.1 Tahapan Perancangan LQG

1. Lakukan Pemodelan
2. Linearisasikan Model Matematis
3. Membangun Feedback Regulator (K) Mencari gain regulator (k), ditentukan terlebih dahulu besarnya metriks pembobot dan R , serta mencari nilai P yang merupakan solusi dari persamaan aljabar riccati. Matriks Q dan R dicari dengan mencoba-coba nilai matriks Q dan R (trial dan error) sampai didapatkan kinerja gain regulatir (k) yang sesuai dengan yang diinginkan.
4. Merancangan Estimator/Kalman Filter (L) Matriks gain estimator/gain kalman (L) adalah matriks yang perlu didesain dalam perancangan kendali LQG. Untuk mendapatkan gain estimator/gain kalman (L) sebelumnya harus ditenrukan terlebih dahulu Q, R dan solusi Steady-State Kalman Gain (L) dari persamaan aljabar riccati dapat di hitung. Penentuan Q dan R harus mempertimbangkan pengaruh besarnya matriks Q dan R terhadap nilai dari matriks gain estimator.gain kalman agar di dapatkan variabel keadaan hasil estimasi yang sama atau mendekati variabel keadaan yang sebenarnya.

2.4 Metode Heuristic

Sebuah metode pemecahan masalah menggunakan eksplorasi dan cara coba-coba Heuristik adalah suatu aturan atau metode untuk bisa menyelesaikan solusi secara penalaan. Rancangan metode Heuristic ini diperoleh dengan cara perubahan parameter yang disesuaikan dengan kinerja plant yang akan dikendalikan[15].Heuristik didefinisikan sebagai aturan untuk memilih cabang-cabang dalam ruang keadaan yang paling tepat untuk mencapai solusi permasalahan yang dapat diterima.

Metode Heuristik dibutuhkan karena pencarian buta (blind search) tidak selalu dapat diterapkan dengan baik, hal ini disebabkan waktu aksesnya yang cukup lama serta besarnya memori yang diperlukan. Dalam pencarian ruang keadaan, heuristik dinyatakan sebagai aturan untuk melakukan pemilihan cabang-cabang dalam ruang keadaan yang paling tepat



untuk mencapai solusi permasalahan yang dapat diterima. Heuristik dapat digunakan pada beberapa kondisi berikut ini :

1. Mengatasi combinatorial explosion. Ada masalah yang kemungkinan arah penyelesaiannya berkembang pesat (bersifat faktorial) sehingga menimbulkan combinatorial explosion. Heuristik merupakan cara untuk menentukan kemungkinan arah penyelesaian masalah secara efisien.
2. Solusi paling optimal mungkin tidak diperlukan. Dalam suatu keadaan, mungkin lebih baik mendapatkan solusi yang mendekati optimal dalam waktu yang singkat daripada solusi yang paling optimal dalam waktu yang lama.
3. Pada umumnya hasilnya cukup baik. Sekalipun tidak optimal, tetapi biasanya mendekati optimal. Membantu pemahaman bagi orang yang menyelesaikan persoalan.
4. Banyak alternatif heuristik yang dapat diterapkan dalam suatu percobaan. Orang yang menyelesaikan persoalan tersebut akan lebih mengerti persoalannya jika mencoba heuristik yang diterapkannya[16].

2.5 Identifikasi Sistem Orde 2

Identifikasi sistem pada penelitian ini menggunakan metode pengamatan respon waktu untuk mengidentifikasi tanggapan transien lingkaran tertutup yang menghasilkan error sekecil mungkin. Dalam beberapa kasus peraktek, karakteristik kerja yang diinginkan dari suatu sistem kendali dicirikan oleh suku besaran daerah asal waktu. Sistem dengan tenaga tidak dapat memberikan repon seketika dan akan menunjukkan tanggapan transien walaupun diberi masukan atau gangguan. Biasanya, karakteristik kinerja suatu sistem kendali dicirikan oleh suku respon transien terhadap masukan tangga satuan karena hal itu mudah ditimbulkan dan cukup drastis.

Jika respon terhadap masukan tangga diketahui, secara matematis dapat dihitung respon untuk sembarang masukan. Respon transien suatu sistem terhadap masukan tangga satuan tergantung transien terhadap variasi sistem[17]. Terdapat cara praktis yang biasa digunakan, yaitu dengan syarat awal standar bahwa sistem mula-mula diam dengan keluaran dan semua turunannya nol. Dengan demikian, karakteristik tanggapannya dapat dengan mudah dibandingkan. Respon transien suatu sistem kendali secara praktek selalu menunjukkan osilasi teredam sebelum mencapai keadaan tunaknya. Dalam menggolongkan karakteristik tanggapan transien suatu sistem kendali terhadap masukan tangga satuan secara umum dikelompokkan sebagai berikut :



1. Waktu tunda (*delay time*), t_d :

adalah waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai setengah dari nilai akhir dari tanggapan untuk pertama kali.

2. Waktu naik (*rise time*), t_r :

adalah waktu yang dibutuhkan untuk naik dari 10% – 90%, 5% – 95%, atau 0% – 100% dari nilai akhir dari tanggapan. Untuk kasus *underdamped*, biasanya digunakan kriteria 0% – 100%. Untuk kasus *overdamped*, biasanya digunakan kriteria 10% – 90%. *Underdamped* atau *overdamped* suatu sistem dapat dilihat dari hasil respon sistem seperti gambar 2.17 berikut :

3. Waktu puncak (*peak time*), t_p :

adalah waktu yang diperlukan respon untuk mencapai puncak lewatan yang pertama kali.

4. *Overshoot* maksimum (*maximum overshoot*), M_p :

adalah nilai puncak maksimum dari tanggapan diukur dari nilai akhir dari tanggapan. Biasanya dirumuskan dalam persentase :

$$M_p = \frac{c_{\max} - c_{\text{akhir}}}{c_{\text{akhir}}} \times 100\% \quad (2.16)$$

5. Waktu tunak (*settling time*), t_s :

adalah waktu yang dibutuhkan tanggapan untuk mencapai nilai akhir dari tanggapan dan tetap berada pada nilai tersebut dalam range persentase tertentu dari nilai akhir (biasanya 5% atau 2%) [17].

2.6 Kriteria Integral Menggunakan *Integral of Absolute Error* (IAE)

Kriteria integrasi membutuhkan data tanggapan mulai dari hingga mencapai keadaan tunak. Dengan demikian kriteria ini didasarkan pada seluruh tanggapan dari proses yang bersangkutan. Kriteria integral yang digunakan pada penelitian ini adalah kriteria IAE (*Integral of Absolute Error*) yang bertujuan untuk mendapatkan nilai IAE sekecil mungkin dengan pemilihan kriteria tergantung pada karakteristik sistem proses dan beberapa syarat tambahan yang diperoleh dari tanggapan lup tertutup. Kriteria IAE lebih populer dikalangan praktisi industri sebab mudah dalam pemakaiannya serta sangat cocok untuk menekan error yang kecil [18].

$$IAE = \int_0^{\infty} |e| dt \quad (2.17)$$



2.7 MATLAB

MATLAB atau yang kita sebut dengan (*Matrix Laboratory*) yaitu sebuah program untuk menganalisis dan mengkomputasi data numerik, dan MATLAB juga merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan, yang dibentuk dengan dasar pemikiran yang menggunakan sifat dan bentuk matriks.



Gambar 2.4 Ikon Matlab

MATLAB merupakan bahasa pemrograman yang dikembangkan oleh *The Mathwork Inc.* yang hadir dengan fungsi dan karakteristik yang berbeda dengan bahasa pemrograman lain yang sudah ada lebih dahulu seperti Delphi, Basic maupun C+

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

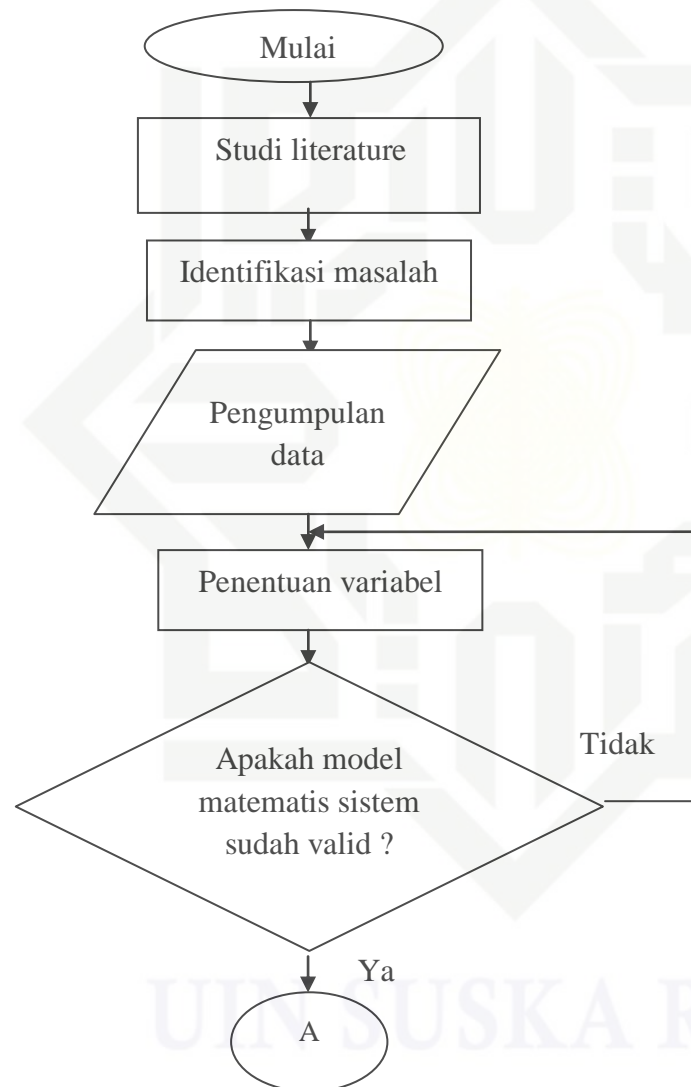
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

BAB III

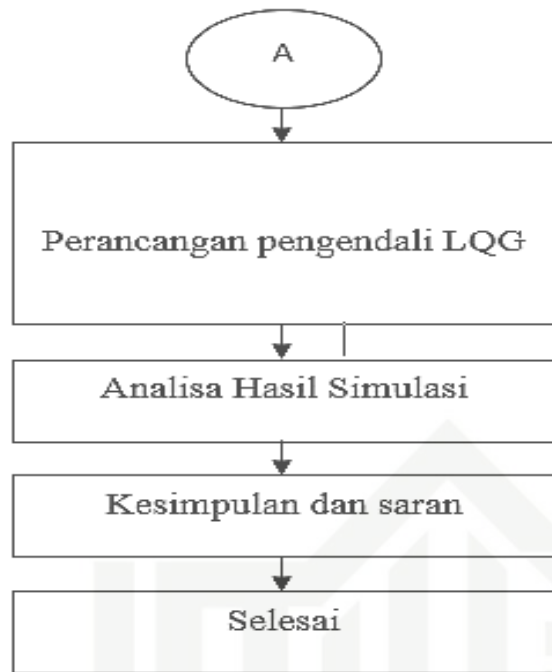
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Proses Alur Penelitian

Pada penelitian ini terdapat beberapa tahapan alur penelitian yang dilakukan, dimulai dari studi literature, identifikasi sistem, penurunan model matematis, perancangan pengendali LQG, dan analisa akhir dari penelitian ini. Adapun tahapan alur penelitian ini adalah sebagai berikut:



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mengemukakan sumber.
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



Gambar 3.1 *Flowchart* Penelitian

Agar tujuan dalam melakukan penelitian ini dapat tercapai, maka pada penelitian ini perlu dilakukan perumusan masalah, penentuan judul serta mencapai tujuan yang diharapkan dari suatu penelitian. Oleh karena itu, terdapat beberapa tahapan rencana yang harus dilakukan yaitu:

1. Identifikasi Masalah

Sebelum melakukan penelitian, carilah masalah yang terdapat pada sistem *turret gun* dengan me-review beberapa referensi yang berkaitan dengan *turret gun* dan kendali.

2. Studi Literatur

Setelah mendapatkan masalah apa yang akan di angkat menjadi Tugas Akhir ini, selanjutnya adalah mencari dan mempelajari referensi terkait dengan tema yang dibahas pada penelitian ini, baik berupa artikel penelitian yang telah dipublikasikan pada internet ataupun berupa jurnal dan tugas akhir.

3. Pengumpulan data pra design

Tujuan dari pengumpulan data pra design adalah untuk mengetahui karakteristik sistem yang akan diteliti, dan transfer fungsi sistem yaitu :

$$G = \frac{c}{s^2 + sa + b}$$

4. Penentuan Variabel

Data-data yang didapat dari pengumpulan data pra design diubah dalam bentuk model matematis dengan persamaan transfer fungsi sebagai berikut:



$$TF = \frac{0,05294}{s^2 + 0.3971}$$

5. Validasi dan Pengujian model matematis *turret gun*

Pada tahapan ini pengujian model matematis plant dalam bentuk transfer fungsi dari sistem turret gun yang diubah dalam bahasa program matlab simulink, lalu menyesuaikan hasil keluaran dari sistem dengan referensi yang digunakan.

6. Desain Pengendali LQG

Pada tahapan ini perancangan pengendali LQG untuk melihat hasil simulasi, apakah sudah stabil atau belum

7. Analisa hasil

Setelah melakukan pengujian, lalu menganalisa hasil simulasi apakah sudah memenuhi tujuan yang telah ditetapkan. Untuk mengklarifikasinya kita dapat melakukan pencarian dari respon sistem yaitu *overshoot*, *delay time*, *settling time*, *error* dan *rise time*. Apabila memenuhi tujuan dan mendapatkan respon yang baik artinya penelitian telah berhasil dan apabila belum memenuhi tujuan maka perlu dilakukan pemeriksaan kembali pada perancangan kendali.

8. Kesimpulan

Pada tahapan ini penulis menyesuaikan antara hasil design dengan tujuan yang ingin dicapai. Apabila tujuan dari penelitian ini telah terpenuhi maka penelitian dapat dinyatakan berhasil, namun apabila hasil dari penelitian belum mencapai tujuan yang ingin dicapai maka perlu dilakukan pemeriksaan kembali terhadap perancangan pengendali. Setelah masalah telah dapat diselesaikan dan tujuan awal dari penelitian ini telah sesuai dengan yang diharapkan maka dapat ditarik kesimpulan dari penelitian ini.

3.2 Pengumpulan Data

Dalam perancangan kendali LQG persamaan yang digunakan adalah persamaan *state space* dari transfer fungsi sistem *turret gun* dengan *set point* 20° dan model matematis *turret gun*.

3.3 Penentuan Variabel

Data-data pra-disain maka dibuat dalam model matematis berbentuk persamaan *transfer function* berbentuk :



$$G = \frac{K}{a s^2 + b s + c} \quad (3.1)$$

Bentuk *transfer function* diatas dapat juga dituliskan menjadi:

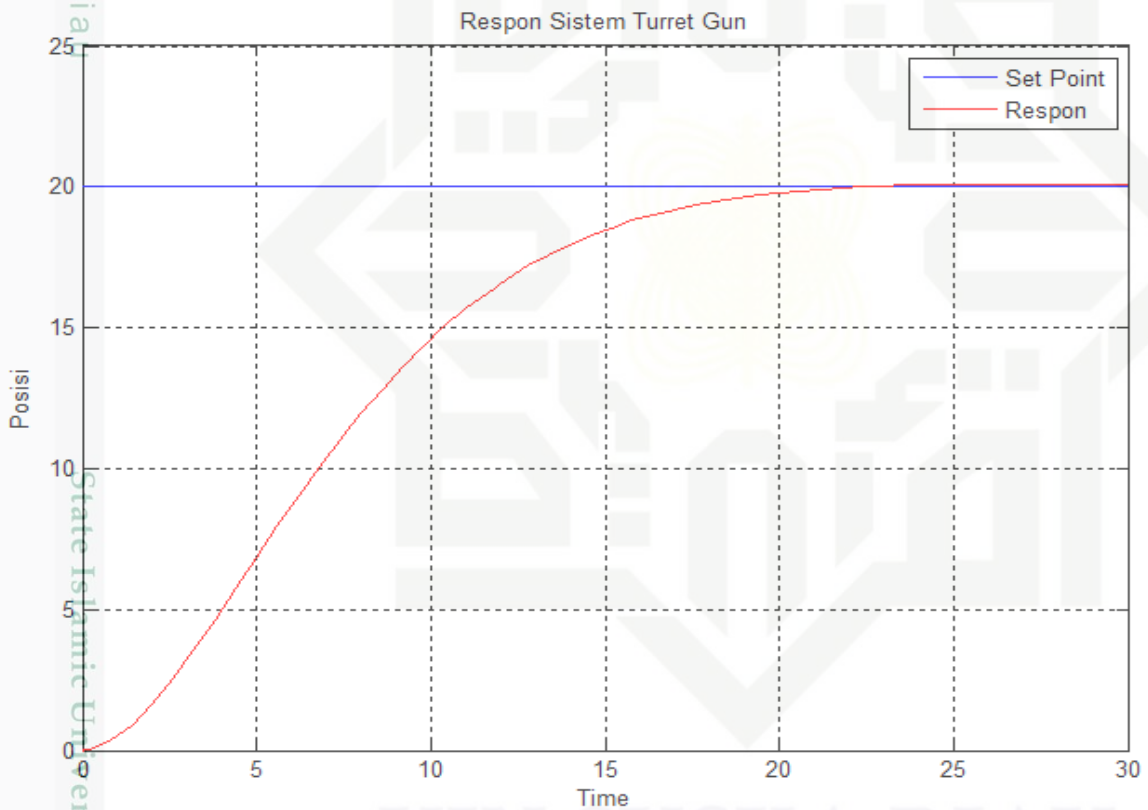
$$G(s) = \frac{0.05294}{s^2 + 0.3971 s}$$

3.4 Validasi Model Matematis

Gambar 3.2 merupakan blok *Simulink* pengujian sistem *turret gun* secara *open loop* tanpa pengendali untuk mengetahui perilaku dan karakteristik dari sistem sebelum dirancang pengendali.



Gambar 3.2 Blok simulasi *turret gun* secara *open loop*



Gambar 3.3 Grafik Respon *Open Loop*



3.5 Initial Result

3.5.1 Perancangan Pengendali *Linear Quadratic Gaussian*

Pada tahapan ini akan dilakukan perancangan sistem pengendalian menggunakan metode Linear quadratic gaussian (LQG) setelah dilakukan pemodelan sistem.

a) Perancangan Regulator

Langkah pertama adalah menentukan matriks estimator dan meletakkan pada blok diagram, menentukan matriks Q dan R untuk mendapatkan indeks performansi yang minimum (J) dari persamaan:

$$J(\theta_0) = \frac{1}{2} S(T) x^2(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T (Qx^2 + Ru^2) \quad (3.2)$$

Kemudian nilai Q digunakan dalam persamaan Ricatti berikut ini untuk mendapatkan matriks S.

$$A^T S + SA - SBR_c^{-1} B^T S + Q_c = 0 \quad (3.3)$$

Matriks S digunakan untuk mendapatkan nilai gain regulator

$$K = R^{-1} B^T S \quad (3.4)$$

b) Perancangan Kalman Filter

Mengestimasi variabel keadaan optimal \hat{x} diperoleh dari persamaan dinamik filter kalman (estimator) sebagai berikut:

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + Kf(y - \hat{y}) \quad (3.5)$$

Kemudian mendapatkan penguatan kalman filter:

$$K_f = PC^T R_f^{-1} \quad (3.6)$$

Sedangkan matriks P diperoleh dari persamaan Ricatti:

$$0 = PA^T + AP - PC^T R_f^{-1} CP + GQ_f G^T \quad (3.7)$$

Dimana, penentuan matriks pembobot Q dan R berpedoman pada :

- Semakin besar harga matriks Q, maka akan memperbesar harga elemen matriks gain kendali dan mempercepat sistem mencapai steady state.
- Semakin besar harga matriks R, maka akan memperkecil harga elemen matriks gain kendali dan memperlambat sistem mencapai steady state.

3.5.2 Memasukkan *transfer function* ke dalam pengendali LQG

Persamaan transfer fungsi dari turret gun diubah dalam bentuk state space karena pada perancangan pengendali LQG dibutuhkan pemodelan state space dari sistem. Adapun pemodelan state space tersebut adalah:



$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{0.05294}{s^2 + 0.3971s}$$

$$s^2 Y(s) + 0.3971s Y(s) = 0.05294 U(s)$$

Dari turunan transfer fungsi pada persamaan *turret gun* tersebut kemudian diturunkan dengan menggunakan metode *inverse transformasi laplace* balik sehingga diperoleh persamaan diferensi orde dua:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 0.3971 \frac{dy}{dt} = 0.05294 U$$

$$\ddot{y} + 0.3971 \dot{y} = 0.05294 U$$

$$\ddot{y} = -0.3971 \dot{y} + 0.05294 U$$

Di definisikan:

$$x_1 = y$$

$$x_2 = \dot{y}$$

$$\dot{x}_1 = \dot{y} = x_2$$

$$\dot{x}_2 = \ddot{y}$$

$$\text{Jadi, } \dot{x}_2 = -0.3971 \dot{y} + 0.05294 U$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.3971 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05294 \end{bmatrix} U \quad (3.8)$$

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Jadi, dari persamaan di atas didapatkan nilai matriks A, B, C, D yaitu sebagai berikut:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -0.3971 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.05294 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Perhitungan yang dilakukan pengendali LQG dilakukan dengan memasukan persamaan state space yang telah didapat kedalam software matlab. Untuk melakukan simulasi menggunakan pengendali LQG dibutuhkan matriks Q dan R yang optimal. Untuk mendapatkan matriks Q dan R yang optimal dilakukan dengan cara menetapkan matriks R bernilai konstan yaitu 0.01, sehingga didapatkan nilai matriks Q adalah bilangan itu sendiri, karena hal inilah yang diinginkan. Penentuan matriks Q menggunakan metode *trial and error* dan dengan pola percobaan dari nilai terendah naik secara konstan dengan analisa IAE. Percobaan metode *trial and error* dengan analisa IAE dapat dilihat pada blok display tampilan IAE yang ada pada diagram MATLAB dan terlampir pada tabel 3.1

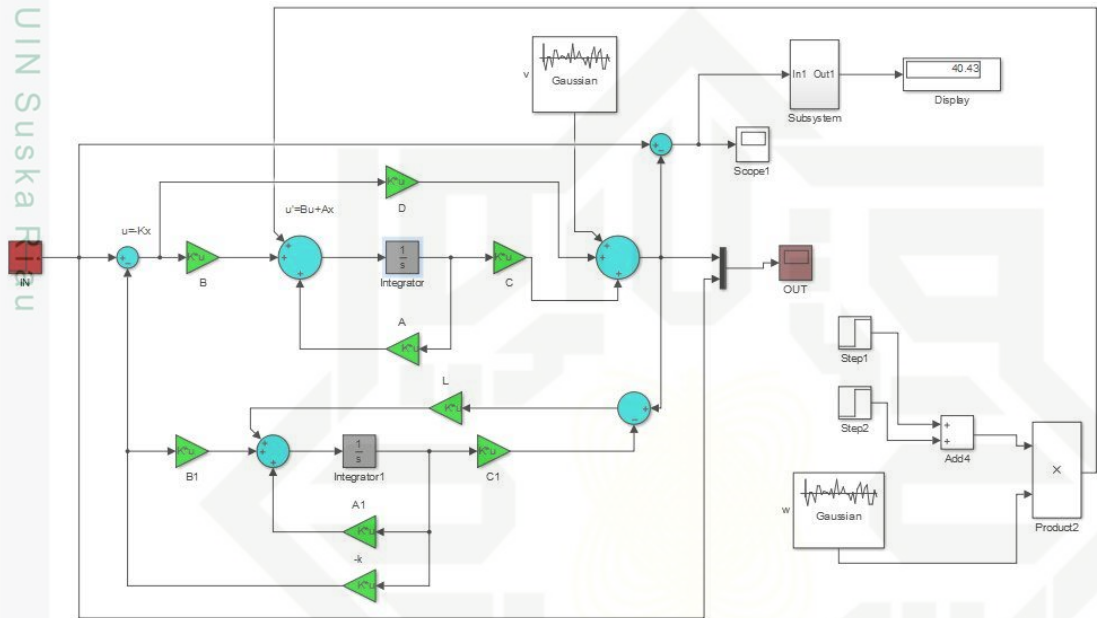
Tabel 3.1 Matriks R Konstan dengan Analisa IAE

No	Matriks Q	IAE
1	$\begin{bmatrix} 0.001 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	970.7
2	$\begin{bmatrix} 0.0011 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	901.9
3	$\begin{bmatrix} 0.0022 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	478.6
4	$\begin{bmatrix} 0.0033 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	286.5
5	$\begin{bmatrix} 0.0044 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	171.9
6	$\begin{bmatrix} 0.0055 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	94.74
7	$\begin{bmatrix} 0.0066 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	40.43
8	$\begin{bmatrix} 0.0077 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	84.29
9	$\begin{bmatrix} 0.0088 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	122
10	$\begin{bmatrix} 0.0099 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	153.4
11	$\begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	155.9
12	$\begin{bmatrix} 0.011 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	179.9
13	$\begin{bmatrix} 0.022 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	323.1
14	$\begin{bmatrix} 0.033 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	386.1
15	$\begin{bmatrix} 0.044 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$	423.4

Pada tabel percobaan 3.1 dilakukan metode *trial and error* dengan memasukkan nilai matriks Q yaitu $\begin{bmatrix} 0.0011 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ kemudian didapatkan nilai IAE namun respon keluaran sistem melebihi *set point*. Selanjutnya dilakukan penambahan nilai matriks Q sebesar 0.0011, nilai IAE semakin kecil namun respon keluaran sistem masih melebihi *set point*. Penambahan terus dilakukan sebesar 0.0011, sampai pada matriks Q = $\begin{bmatrix} 0.0066 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ pada matriks ini respon keluaran sistem telah mencapai *set point* dan didapatkan nilai IAE. Selanjutnya dilakukan penambahan nilai matriks Q sebesar 0.0011, namun nilai IAE semakin besar dan respon keluaran sistem tidak mencapai *set point*. Penambahan terus dilakukan sampai pada matriks Q $\begin{bmatrix} 0.044 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ nilai IAE lebih besar dari pada matriks Q = $\begin{bmatrix} 0.01 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$ dan respon

keluaran sistem semakin tidak mencapai *set point*. Sehingga dilakukan perancangan pengendali LQG dengan menggunakan nilai matriks $Q = \begin{bmatrix} 0.0066 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, matriks $R = [0.01]$ dan nilai $IAE = 4.43$ pada sistem *turret gun* sumbu *azimuth*.

Perancangan pengendali LQG adalah berdasarkan penurunan persamaan matematis LQR pada bab 2. Sehingga berdasarkan turunan matematis dan skema LQR yang sudah didapat akan dibuat ke Simulink. Blok-blok Simulink pengendali LQR pada sistem *turret gun* sumbu *azimuth* diperlihatkan gambar berikut:



Gambar 3.4 Blok Diagram *Turret Gun* Sumbu *Azimuth* dengan Pengendali LQG

Adapun program yang dimasukkan dalam M – file adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar (3.4) dibawah ini:

```
Command Window
azimuth.m x +
1 - A= [0 1 ; 0 -0.3971]
2 - B= [0 ; 0.5294]
3 - C= [1 0]
4 - D= [0]
5 - R= [0.01]
6 - Q= [0.0066 0; 0 0]
7 - sys=ss(A,B,C,D);
8 - [K,S,e]=lqr(sys,Q,R);
9 - Rf=[0.001];
10 - Qf=[2];
11 - [kest,L,P]=kalman(sys,Qf,Rf)
```

Gambar 3.5 Tampilan Program M-File Sistem *Turret Gun* Sumbu *Azimuth* Menggunakan Pengendali LQG



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan simulasi dan hasil analisa respon sistem yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa pengendali LQG berhasil membuat sistem *turret gun* mencapai *set point* dan mampu mengatasi lambatnya sistem mencapai *set point* nya dengan waktu 5.2 detik dari total waktu 30 detik. Namun pada simulasi ini masih terdapat *overshoot* sebesar 1.10%.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan pada sistem *turret gun* di sumbu azimuth dengan menggunakan LQG, diharapkan peneliti selanjutnya menggunakan pengendali yang mampu mendapatkan respon waktu yang lebih cepat dari penelitian ini dan mengatasi *overshoot*.

- Hak Cipta Ditangguhkan UIN Suska Riau
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



DAFTAR PUSTAKA

- [11] E. E. Abroad, F. The, I. Game, N. Generasi, and M. Indonesia, "Ilmu Pertahanan Dan Pendidikan Bela Negara," vol. 54, no. 38, pp. 1–82, 2015.
- [12] S. Anwar, "Dampak dari Kebijakan Pemerintah Indonesia di Bidang Industri Pertahanan Terhadap Strategi Operasi dan Rantai Pasok dari PT Pal dan PT Daya Radar Utama dalam Memproduksi Alat Utama Sistem Senjata TNI Angkatan Laut," J. Pertahanan Bela Negara, 2018.
- [13] D. W. Wardhana, A. Wahyudi, and H. Nurhadi, "Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendali Sumbu Azimuth Turret Pada Turret-Gun Kaliber 20mm," J. Tek. ITS, 2016.
- [14] D. K. Ariwibowo, A. Wahjudi, and H. Nurhadi, "Perancangan Sistem Kontrol PID Untuk Pengendali Sumbu Elevasi Gun Pada Turret-Gun Kaliber 20 Milimeter," J. Tek. ITS, 2016.
- [15] S. Vittal Rao, M. S. Mattice, and N. P. Coleman, "Design of reduced order LQG/LTR controllers for turret-gun system," 1989.
- [16] E. Zafiriou, "Applied optimal control and estimation by Frank L. Lewis, prentice hall and texas instruments, englewood clgjs, nj, 1992, 624 pp.," AICHE J., 1994.
- [17] Ahusda, Prayunanta dan katherin Indriawati. "Penerapan Kontrol Optimal LQG Pada Sistem Kontrol Cascade PI&P Untuk Pengendalian Temperatur Steam Di superheater." Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- [18] Rodhiyah Dinayati, Aisyah Siti Aulia, Masroeri A. A. "Perancangan Sistem Kendali Optimal Multivariabel Linear Quadratic Gaussian (LQG) Pada Kapal FPB 38 Untuk Meningkatkan Performansi Manuvering" Jurusan Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- [19] Supriajaya, Dedi. "Perancangan Kendali Optimal Metode Linear Quadratic Gaussian (LQG) Untuk Pengendalian Posisi Pada Sistem Magnetic Levitation Ball". Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Negri Sultan Syarif Kasim Riau
- [10] S. Mushonnifah, Subchan, and H. Nurhadi, "Numerical simulation of acceleration and force control in turret-gun system with disturbance," ICAMIMIA 2015 - Int. Conf. Adv. Mechatronics, Intell. Manuf. Ind. Autom. Proceeding - conjunction with Ind. Mechatronics Autom. Exhib. IMAE, vol. 2015, no. Icamimia, pp. 151–155, 2016.
- [11] M. N. T, B. Pramujati, H. Nurhadi, and E. Pitowarno, "Based on Force Control Method," pp. 13–18, 2014.

Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber.

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



- [12] Nise, N.S., "Control System Engineering", 6th Edition, John Wiley & Sons. Inc., 2011
- [13] Qomarudin, M Nur. "Cerita singkat tentang Linear Quadratic Gaussian Regulator". 2016
- [14] Wahjono, Endro, dkk. "Pengaturan Kecapatan Motor Induksi Tiga Fasa Dengan Metoda Direct Torque Control Menggunakan Fuzzy Logic Controller". Jurusan Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, 2009.
- [15] Permata, Sari Ranti. "Penalaan Parameter Kontrol PID dengan Metode Heuristik Aplikasi Sistem Pengendalian Kecepatan Motor DC". Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional (ITENAS) Bandung.
- [16] Hayadi, Elson, dkk. "Kecerdasan Buatan (Metode Heuristic)". Jurusan Teknik Informatika Sekolah Tinggi Teknik PLN. 2015
- [17] Ogata, Katsuhito. "Modern Control Engineering Fifth Edition", Prentice Hall, 1970.
- [18] Heriyanto. "Pengendalian Proses" Politeknik Negeri Bandung. Bandung, 2010
- [19] Asnil. "Kendali Tegangan Keluaran Buck Converter Menggunakan Kontroller LQG/LTR". Vol. I, No. 1 – April 2015. ISSN 2302 – 3309.
- [20] A.M. Lopez, J.A. Miller, C.L Smith and P.W. Murril. "Tuning Controllers with Error-Integral Criteria". Instrumentation Technology. 1976
- [21] Alisia Rohelita, "Perancangan Kendali LQR-PID Untuk Pengendalian Sumbu Azimuth Pada Turret Gun Kaliber 20mm". Jurusan Teknik Elektro Universitas Islam Negeri Sultan Syarif Qasim Riau. 2019.

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

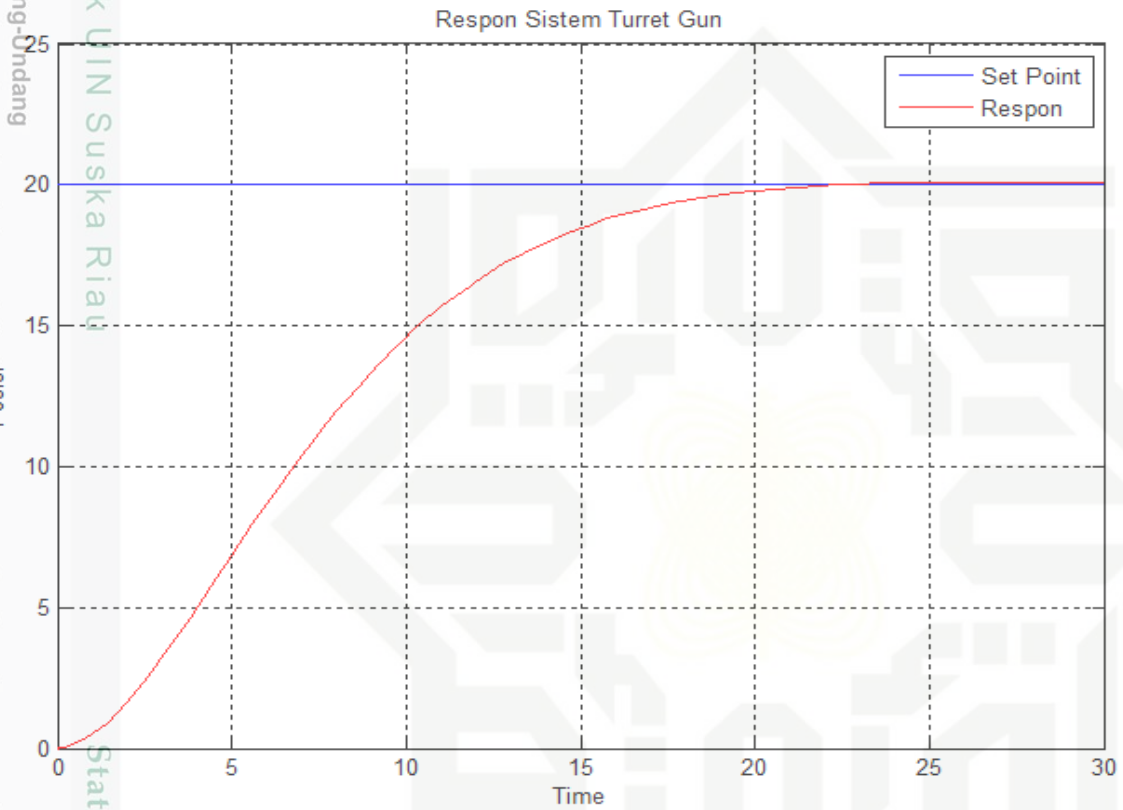
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.



LAMPIRAN A

Blok Diagram dan Respon Keluaran

Blok diagram secara *open loop* dan respon keluarannya



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



2.

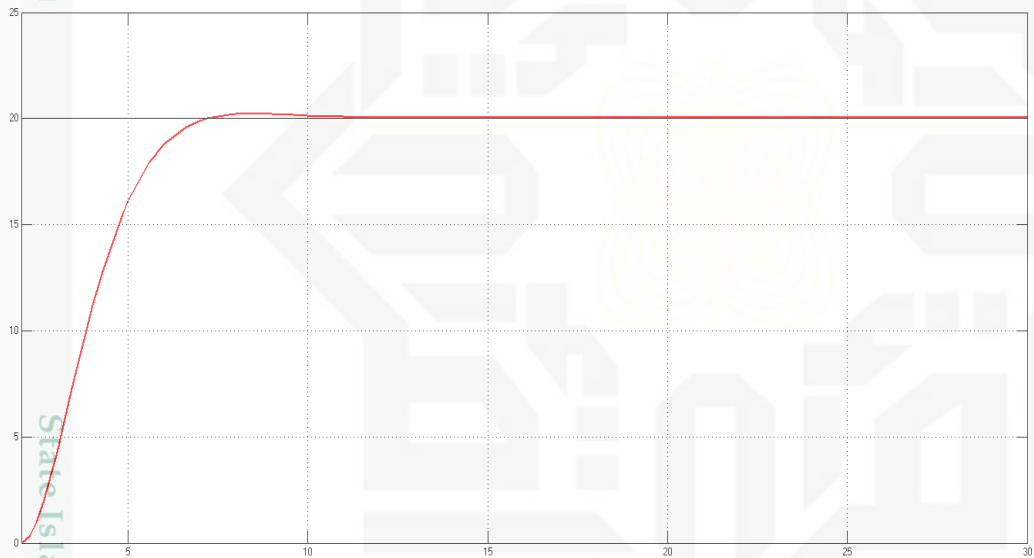
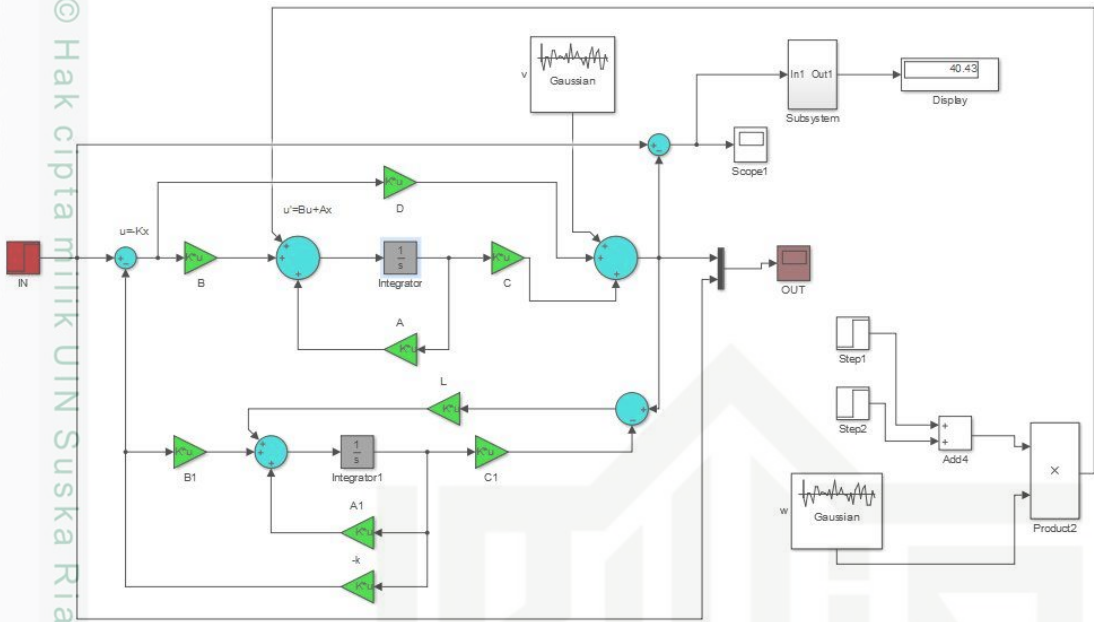
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

Blok diagram menggunakan pengendali LQG dan respon keluarannya

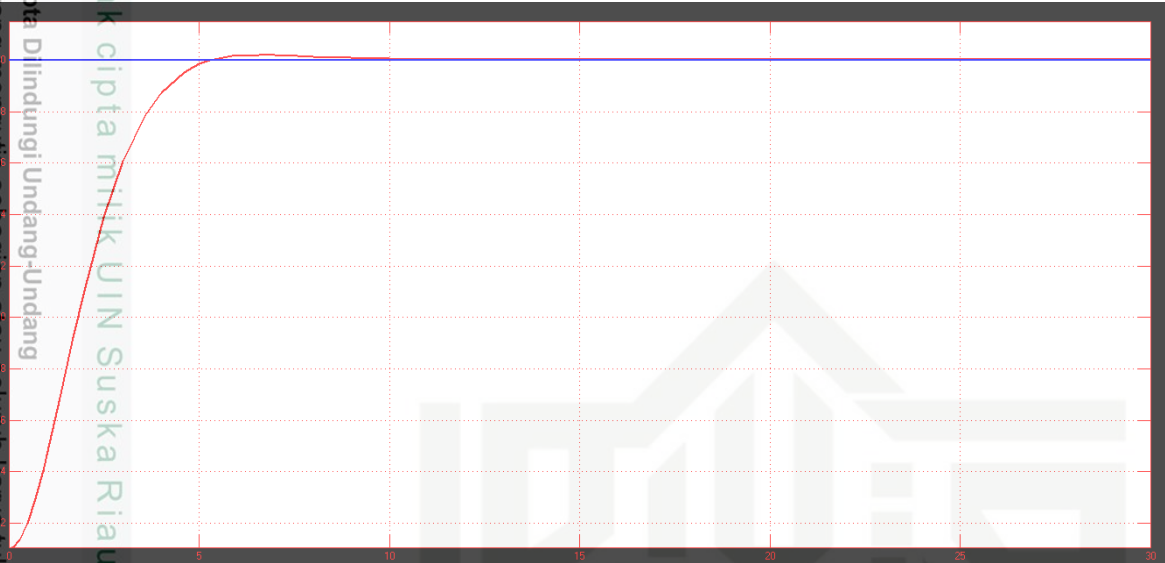




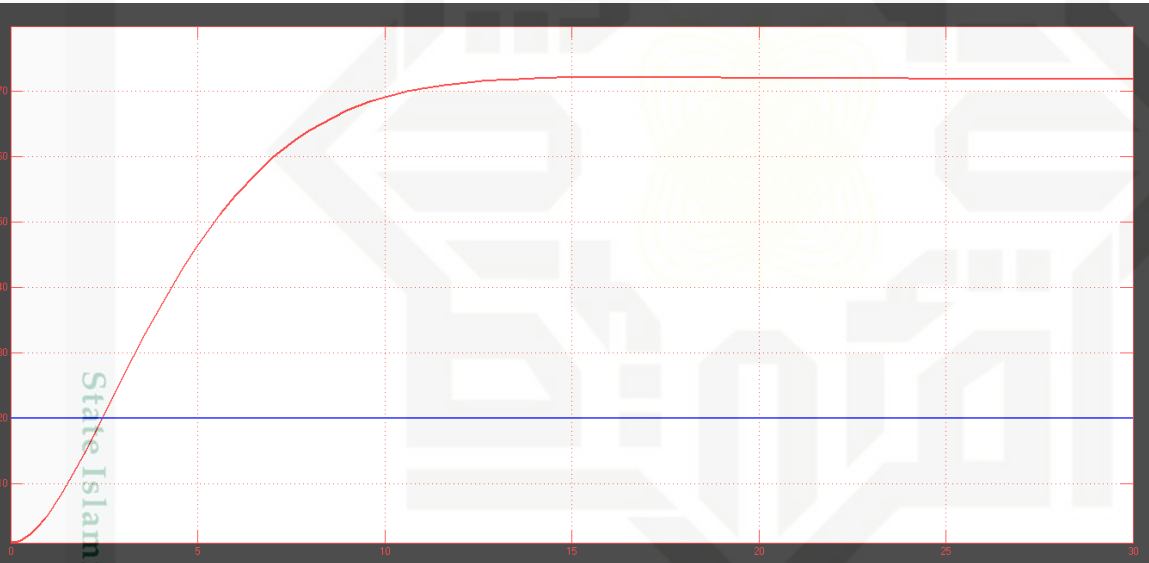
LAMPIRAN B

Proses Tuning nilai R pada pengendalian LQG dengan metode *Trial and Error*

1. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$



2. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.1$



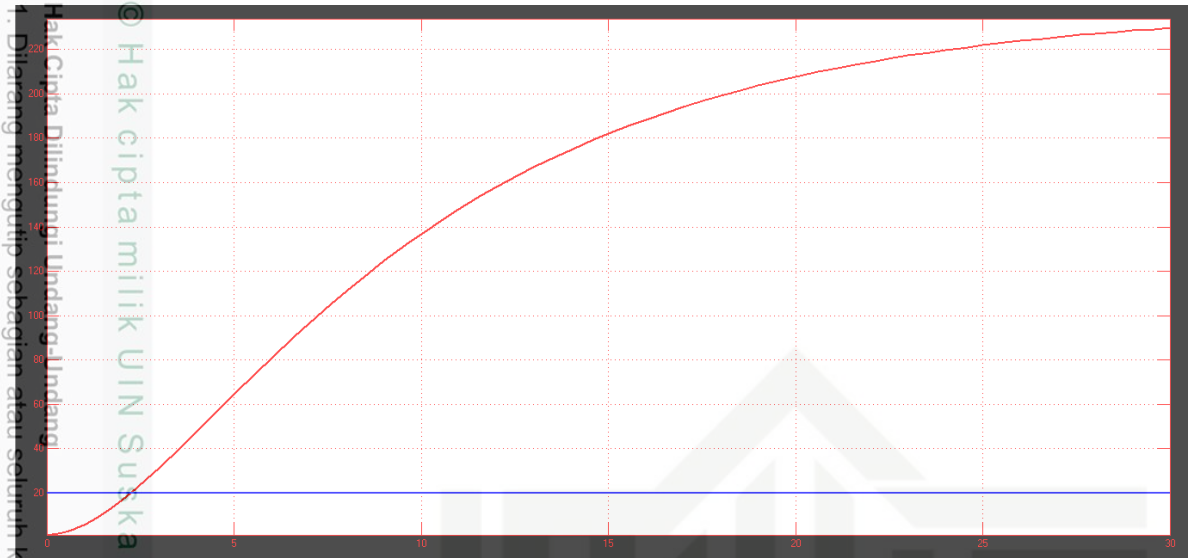
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

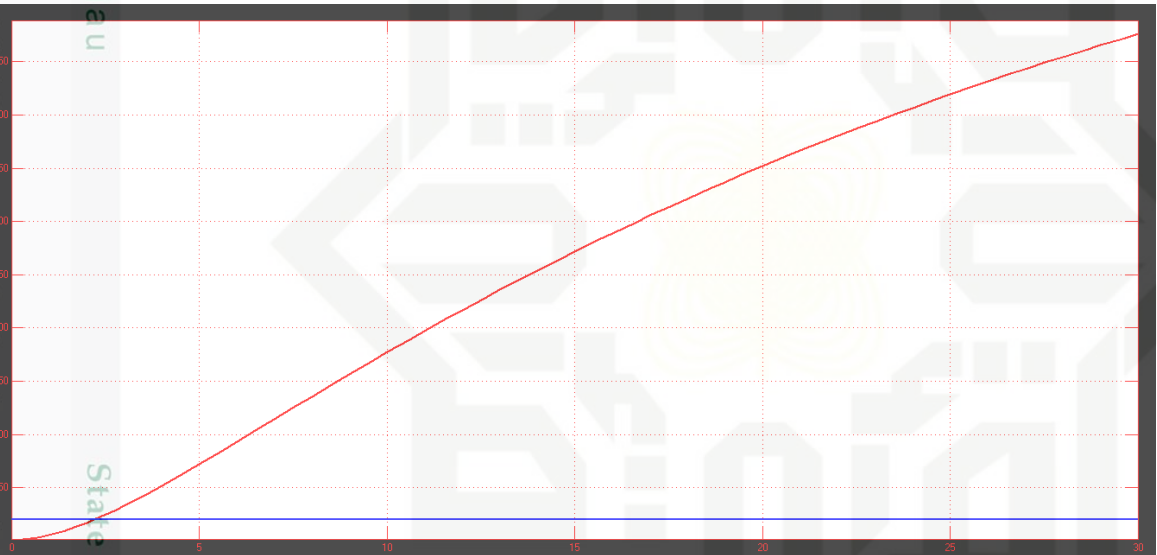
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



3. Hasil simulasi LQG dengan $R=1$



4. Hasil simulasi LQG dengan $R=10$



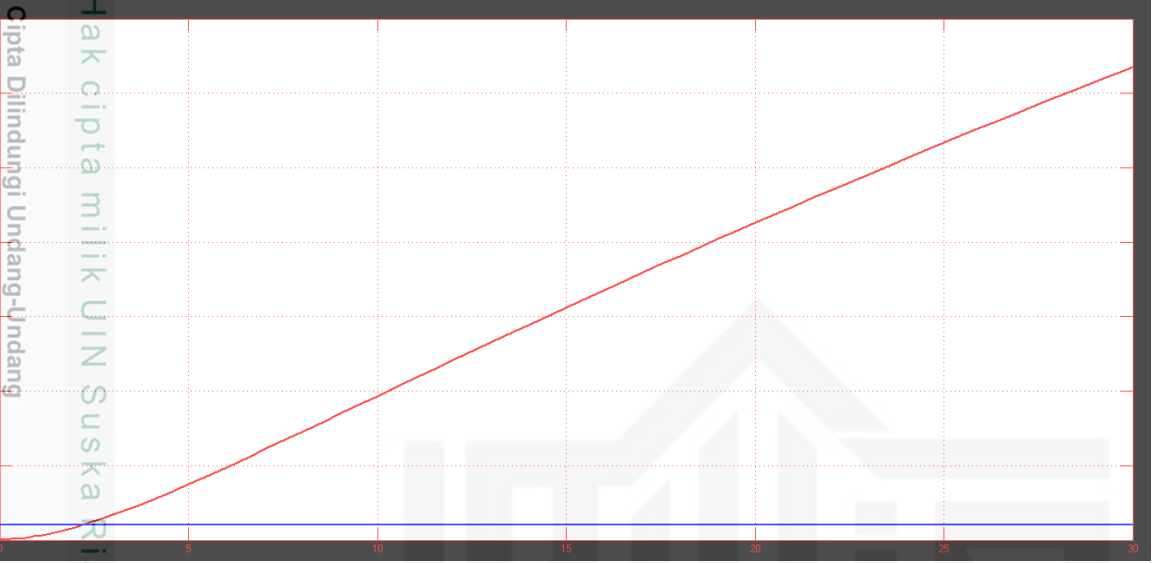
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

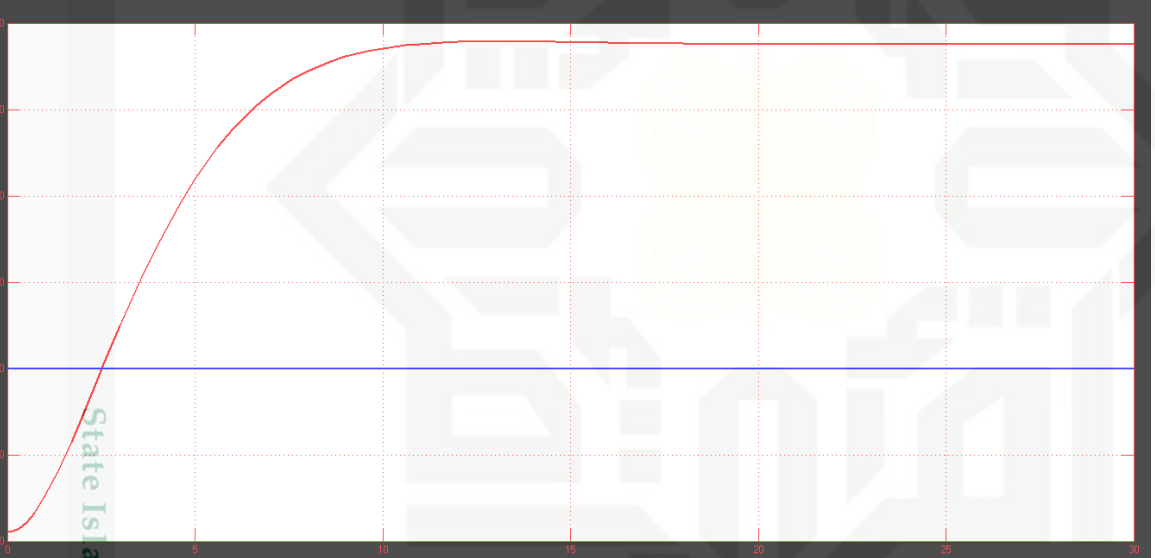
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



5. Hasil simulasi LQG dengan $R=100$

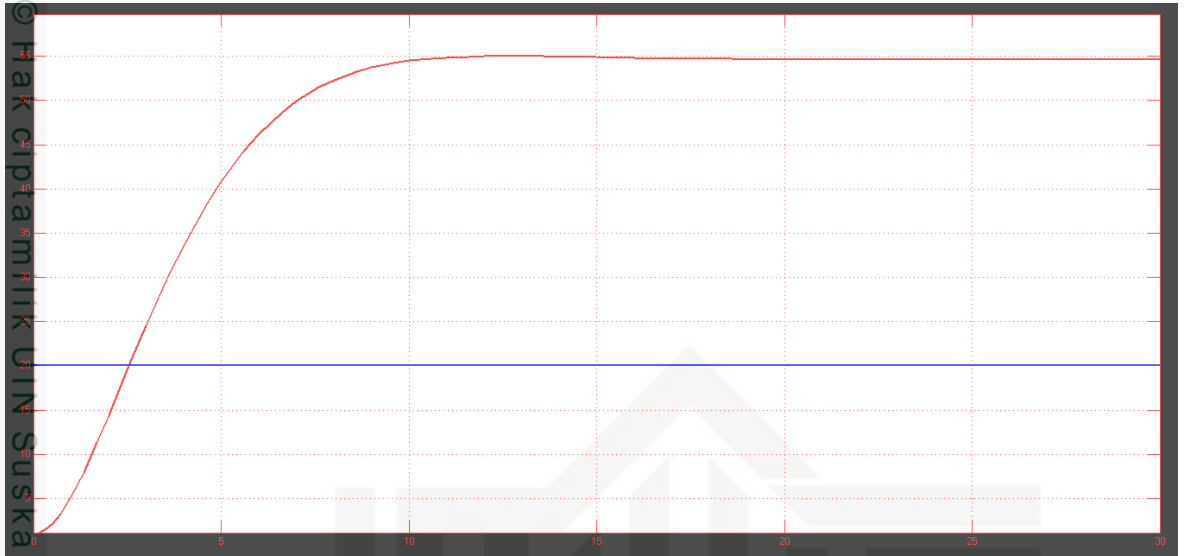


6. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.001$

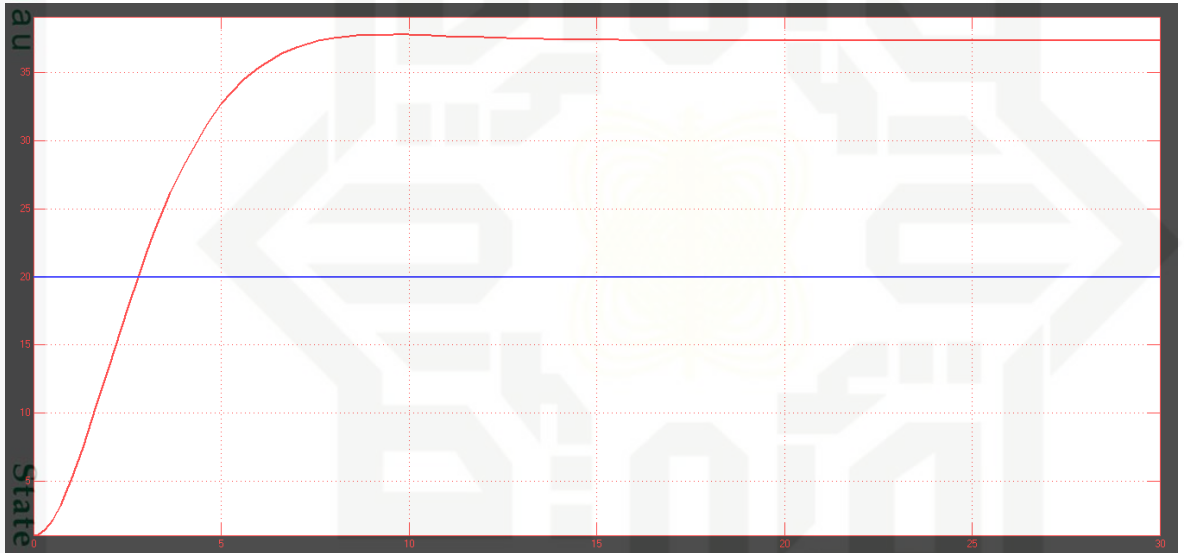


1. Unarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

7. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0011$



8. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0022$



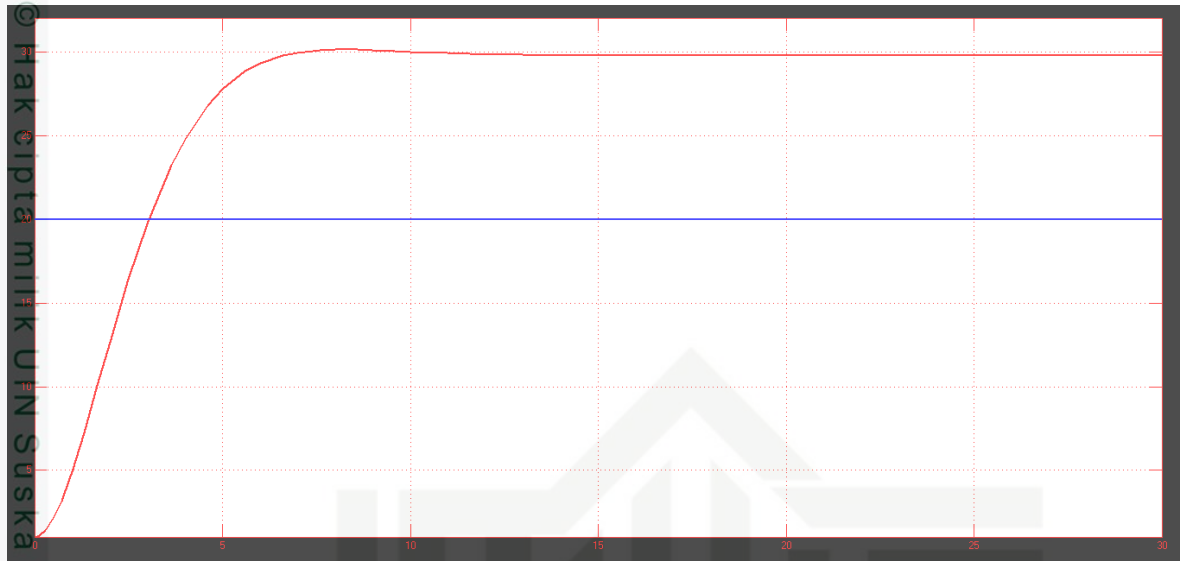
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

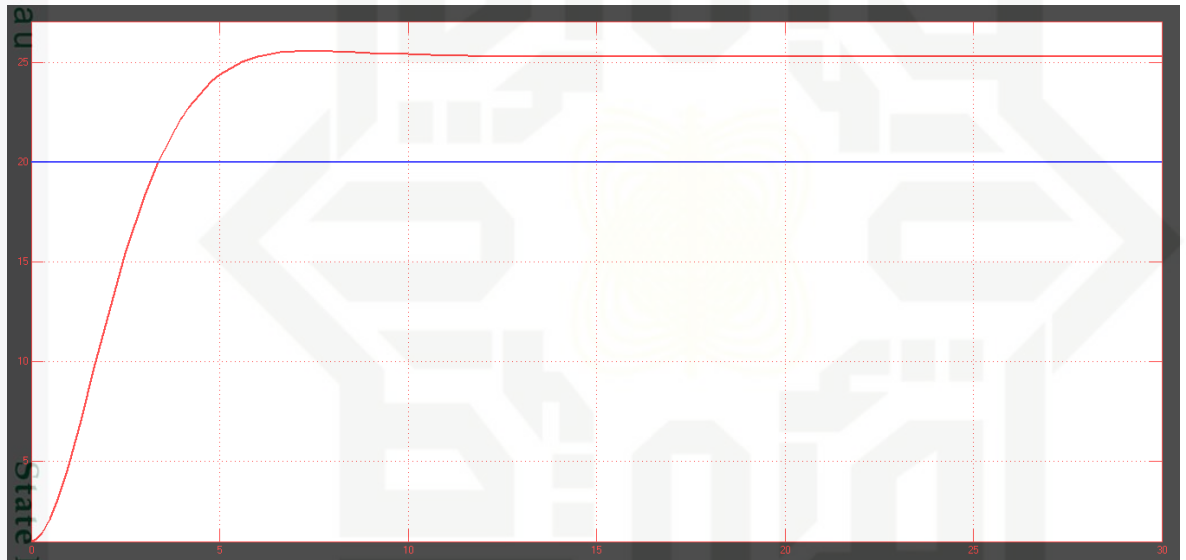
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

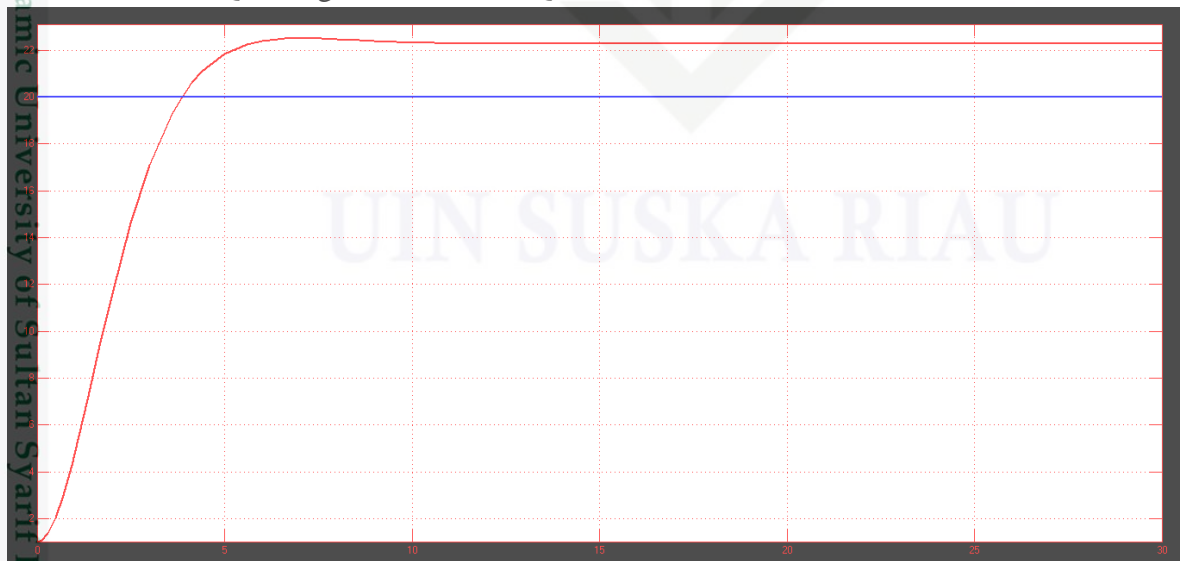
9. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0033$



10. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0044$



11. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0055$



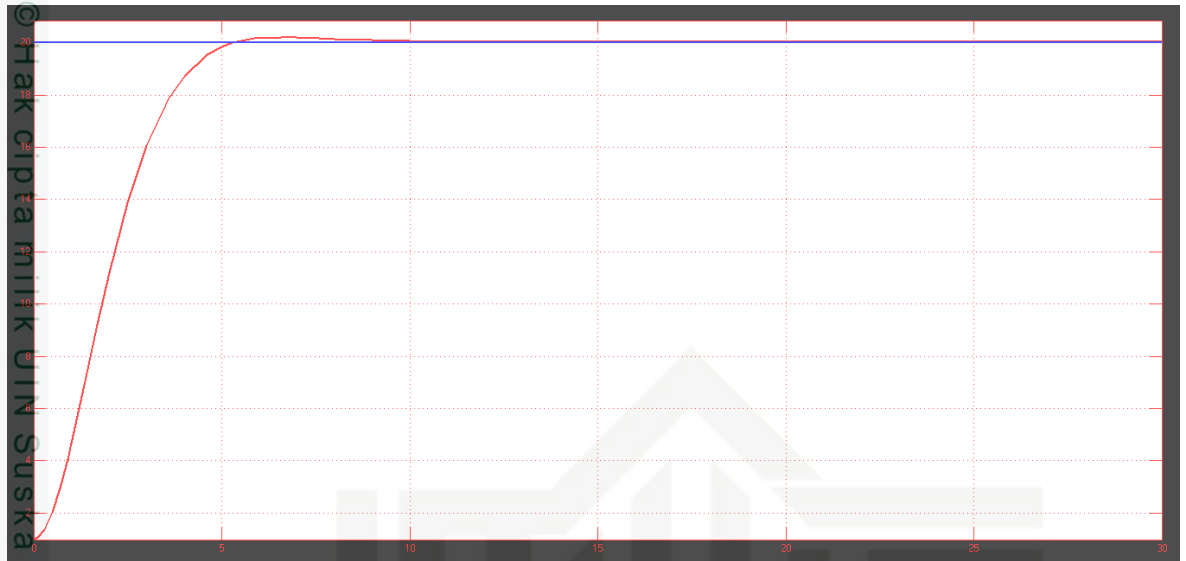
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

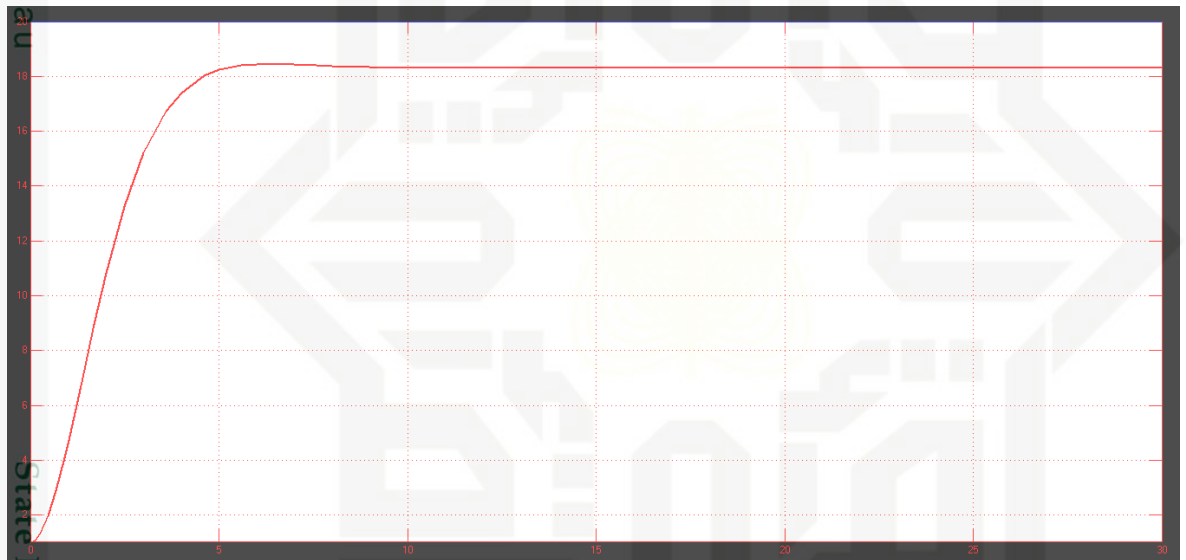
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

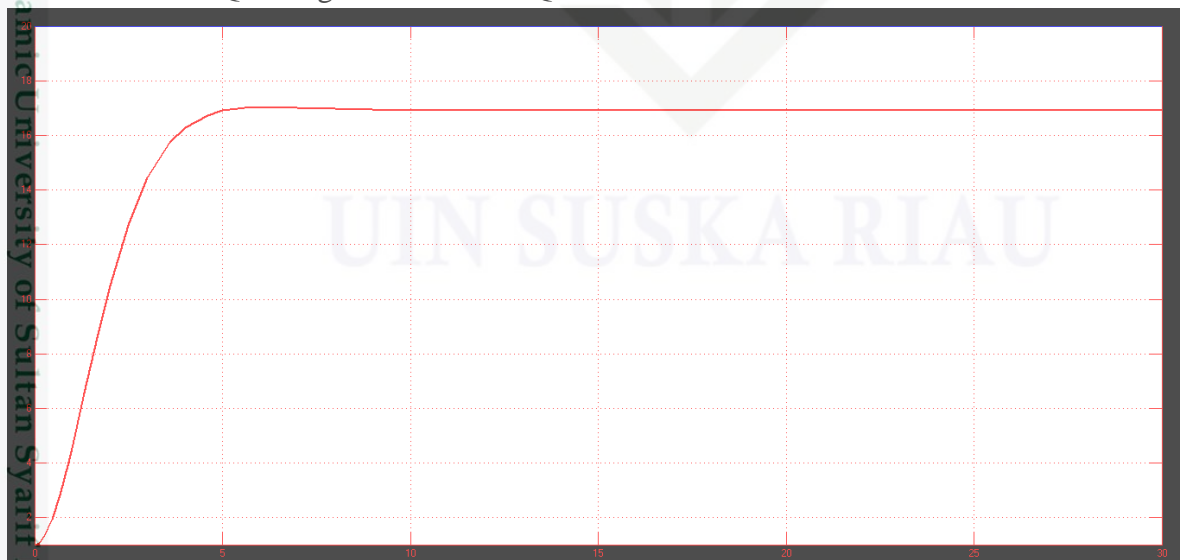
12. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0066$



13. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0077$



14. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0088$



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

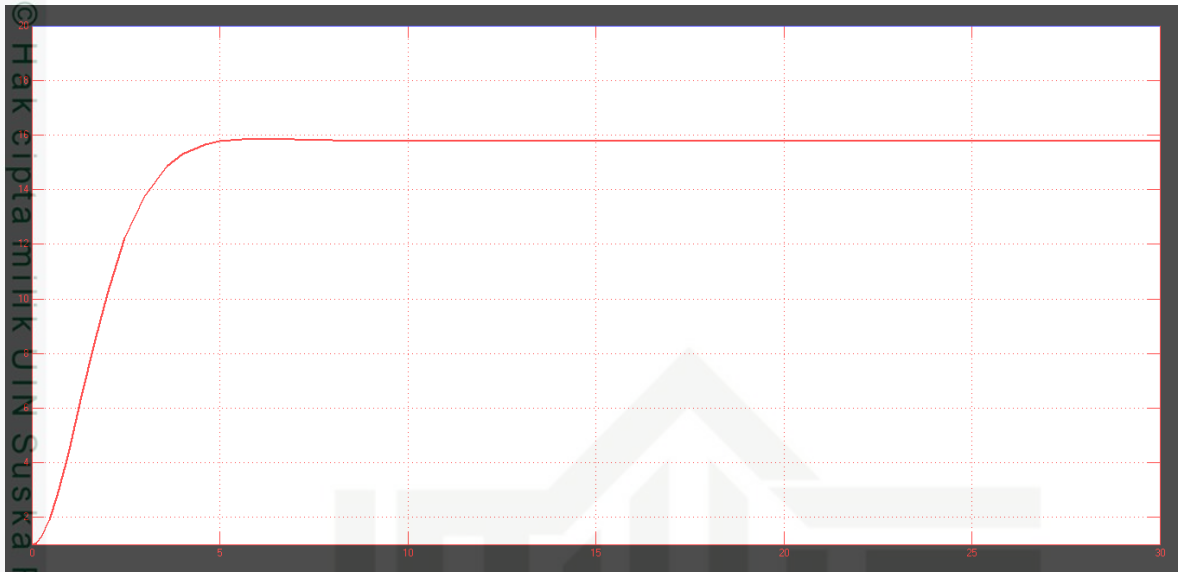
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

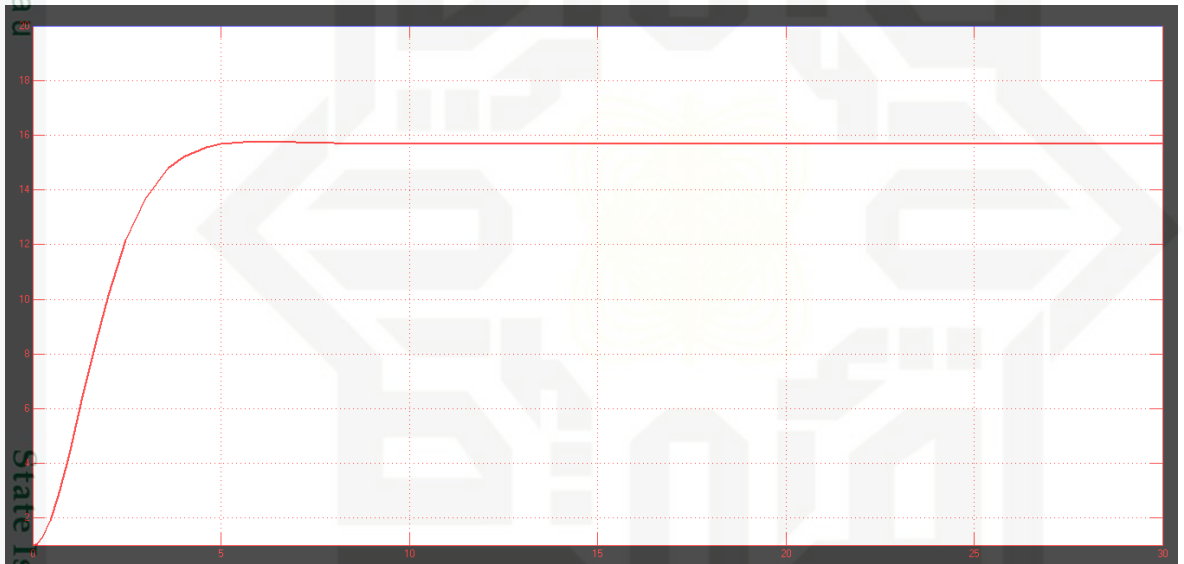


Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

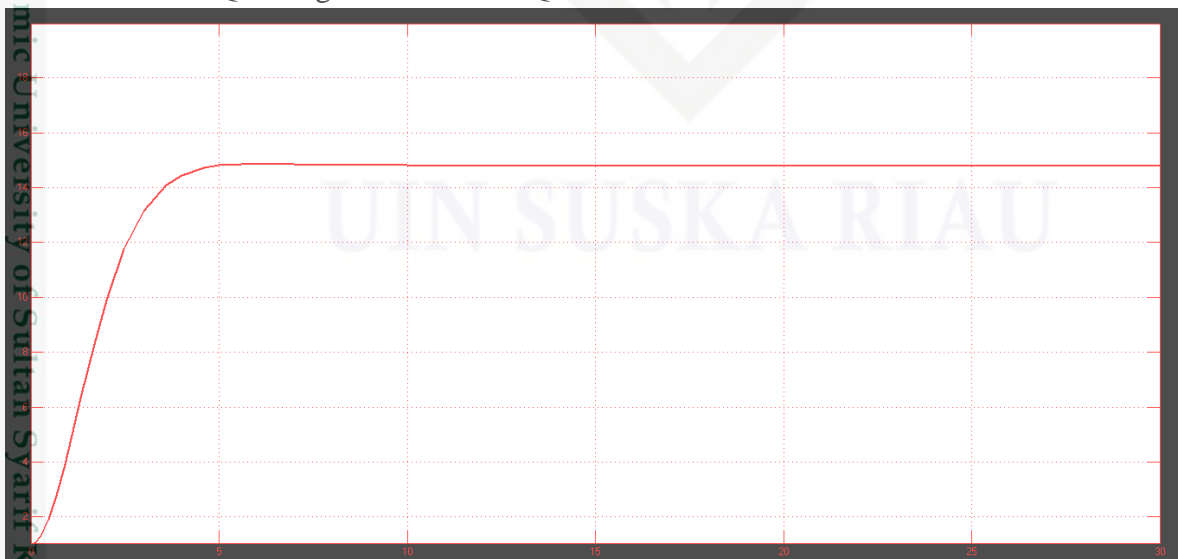
15. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.0099$



16. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.01$



17. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.011$



1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.



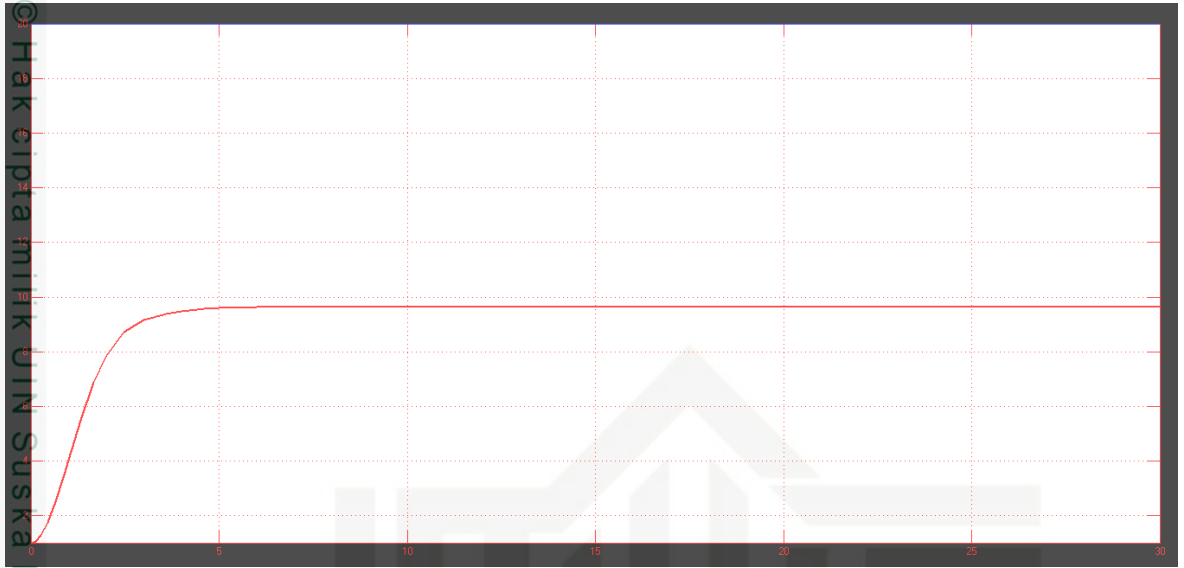
Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber:

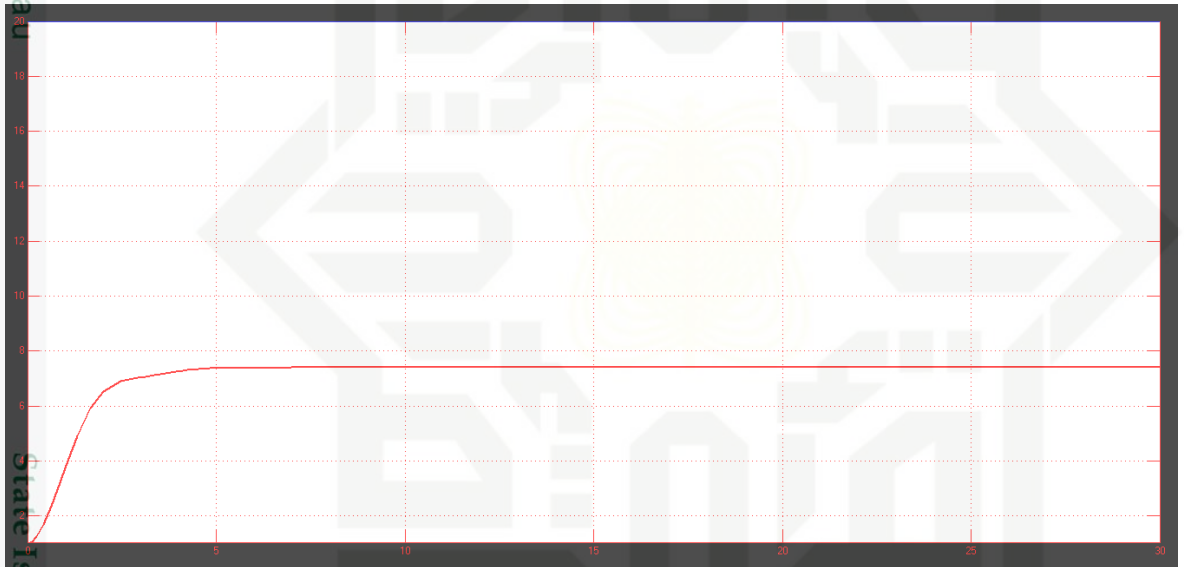
- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.

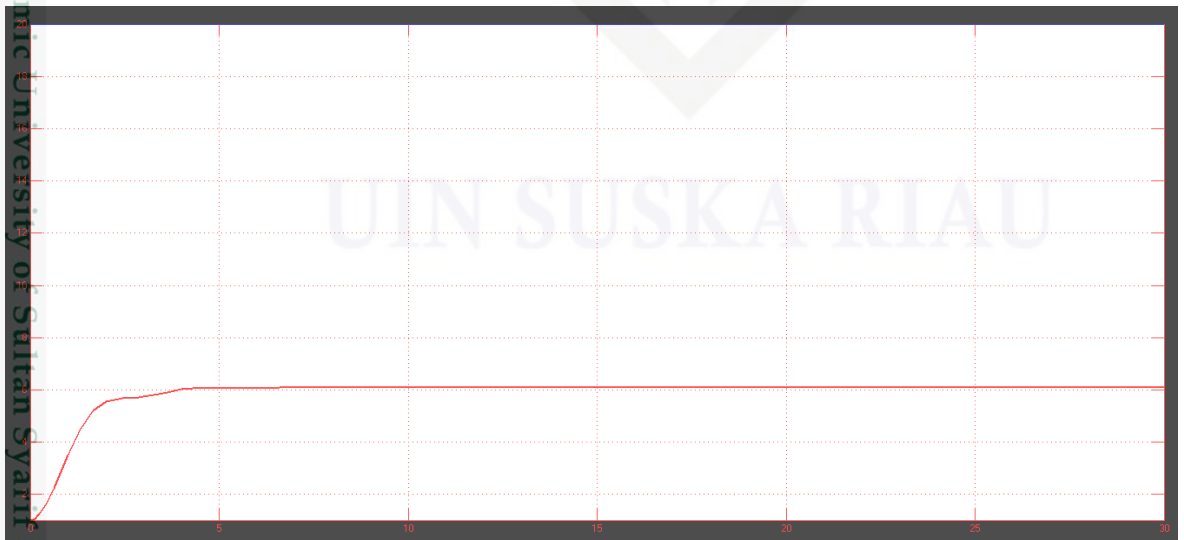
18. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.022$



19. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.033$



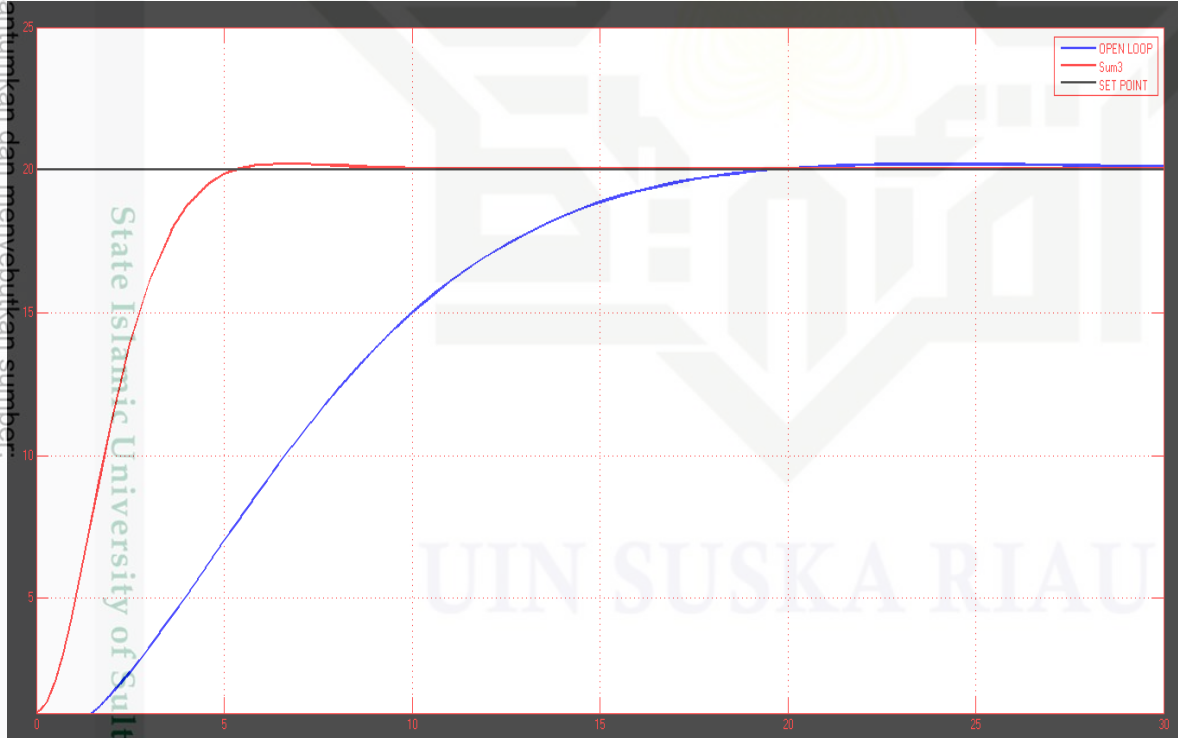
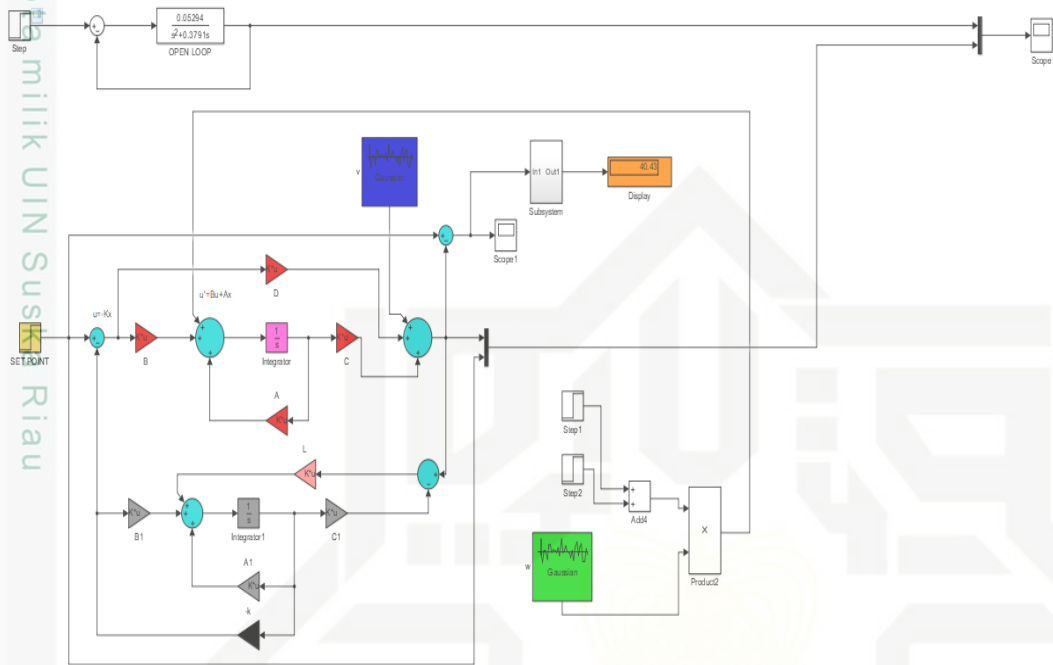
20. Hasil simulasi LQG dengan $R=0.01$ dan $Q=0.044$



LAMPIRAN C

Perbandingan Hasil System *Turret Gun* Secara *Open Loop* Dan Dengan Pengendali LQG

1. Blok diagram dan hasil perbandingan *open loop* dan dengan pengendali LQG pada sistem *turret gun*.



Hak Cipta Dilindungi Undang-Undang

State Islamic University of Sultan Syarif Kasim Riau

•

- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar UIN Suska Riau.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin UIN Suska Riau.